



DE03G8793

ETDE-DE--1465

**BERICHTE DES INSTITUTS FÜR METEOROLOGIE  
UND GEOPHYSIK  
DER UNIVERSITÄT FRANKFURT/MAIN**

**Nr. 105**

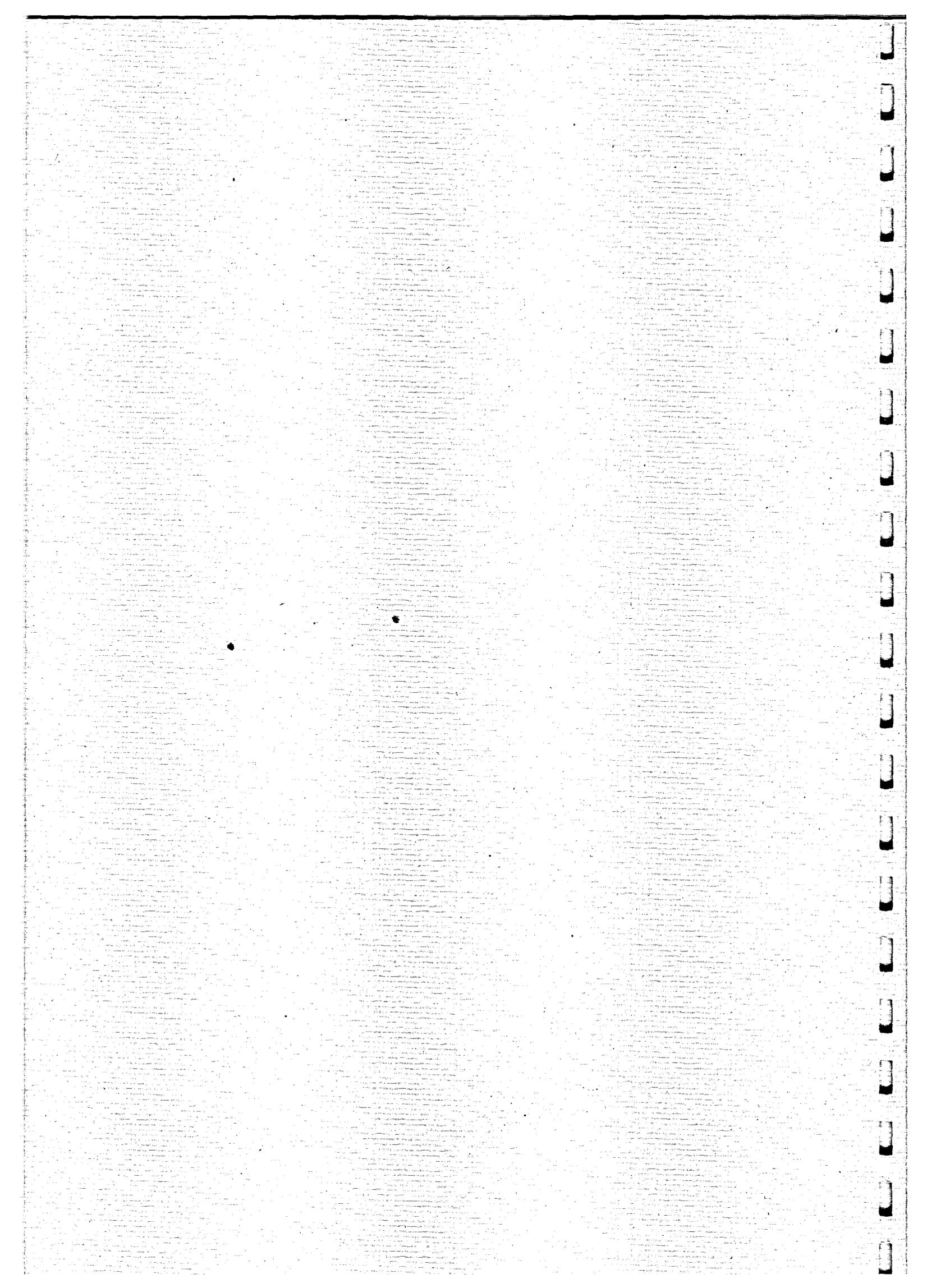
**Michael Denhard und Christian-D. Schönwiese**

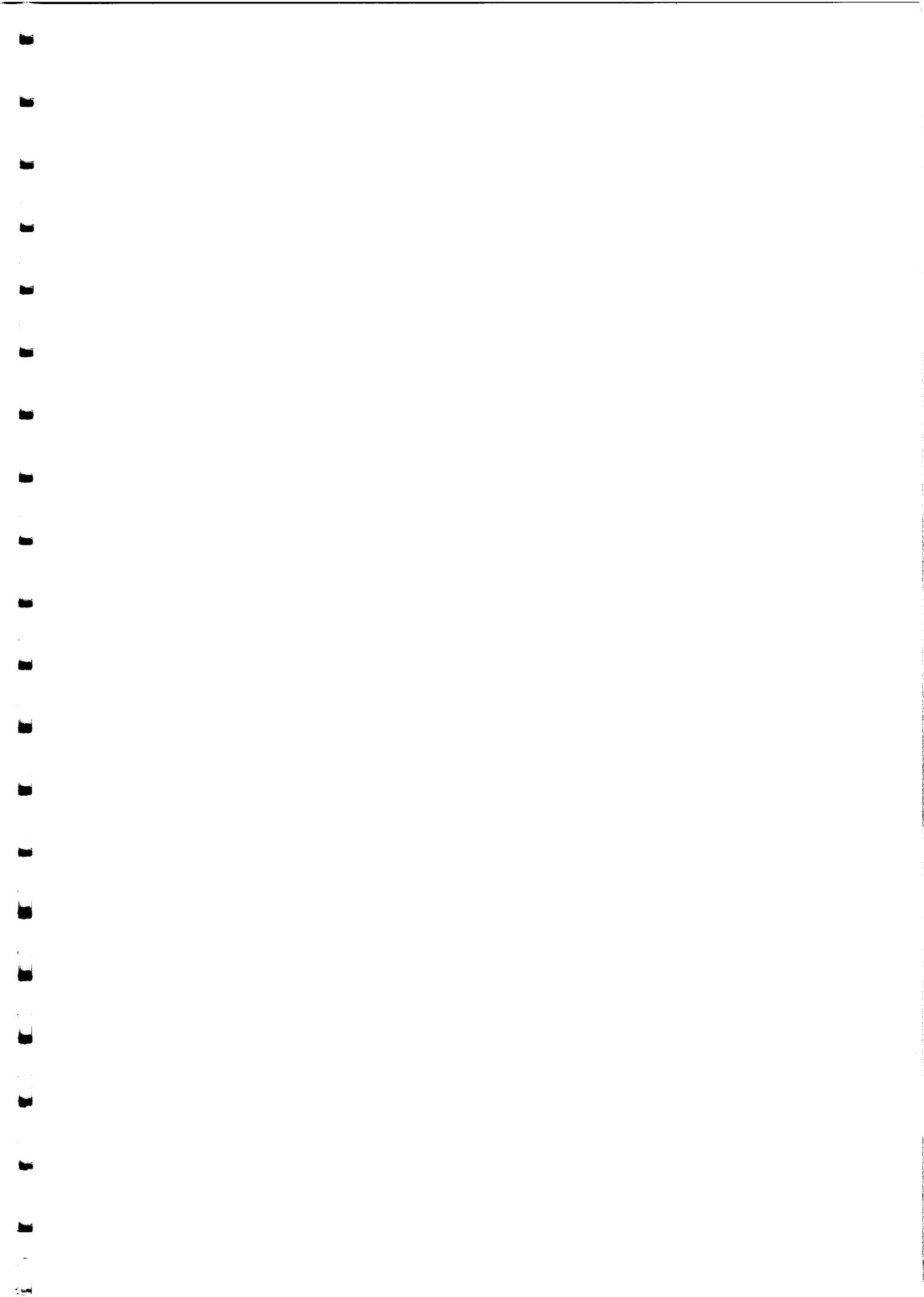
**Statistisch-dynamische Klimavorhersage  
für Europa und Deutschland**

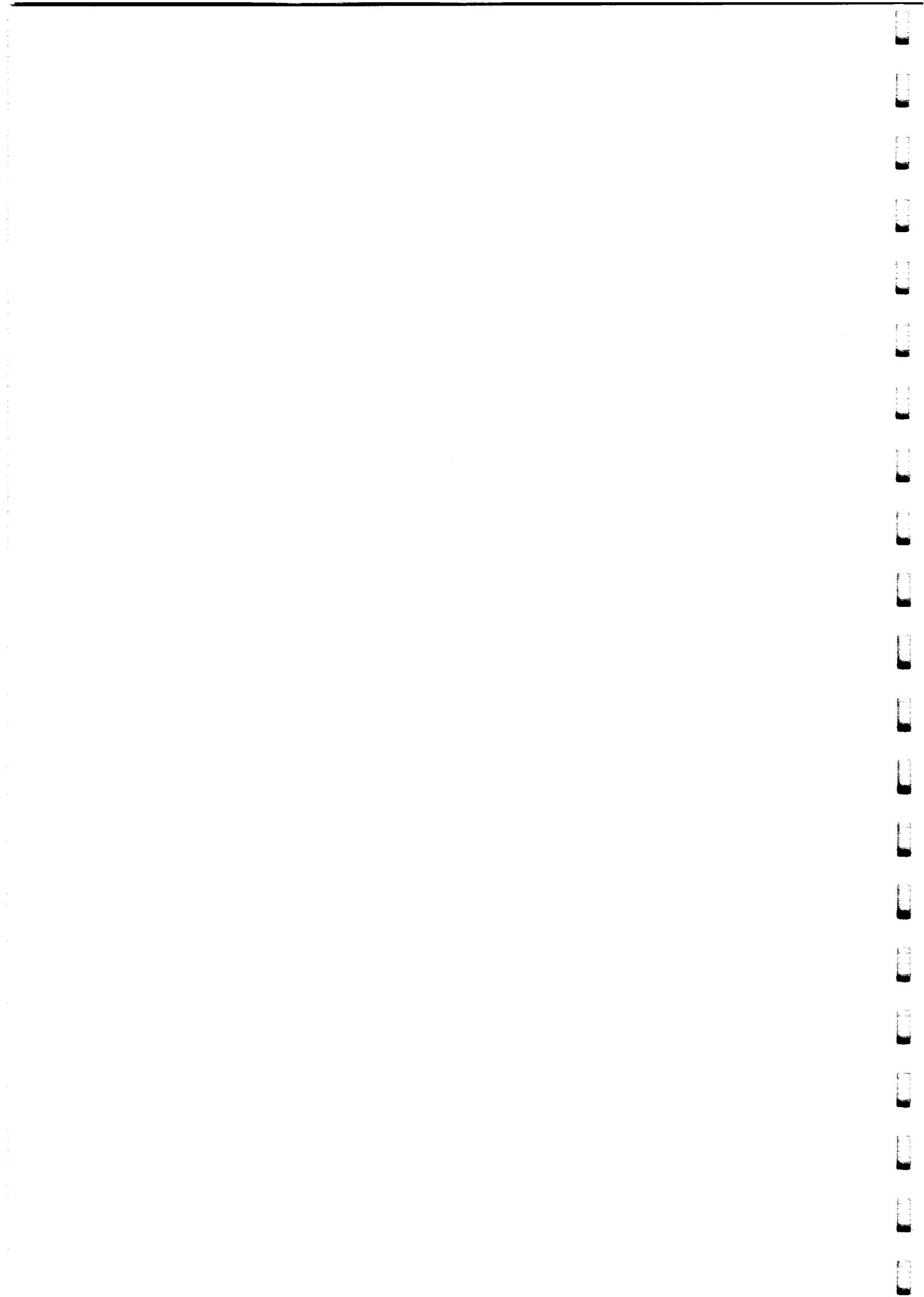
**Abschlußbericht zum Vorhaben 01 LA 9865/6 des BMBF**

**2001**

**Im Eigenverlag des Instituts  
Postfach 11 19 32  
60054 Frankfurt/Main**







**BERICHTE DES INSTITUTS FÜR METEOROLOGIE  
UND GEOPHYSIK  
DER UNIVERSITÄT FRANKFURT/MAIN**

Nr. 105

Michael Denhard und Christian-D. Schönwiese

**Statistisch-dynamische Klimavorhersage  
für Europa und Deutschland**

Abschlußbericht zum Vorhaben 01 LA 9865/6 des BMBF

2001

Im Eigenverlag des Instituts

Postfach 11 19 32

60054 Frankfurt/Main

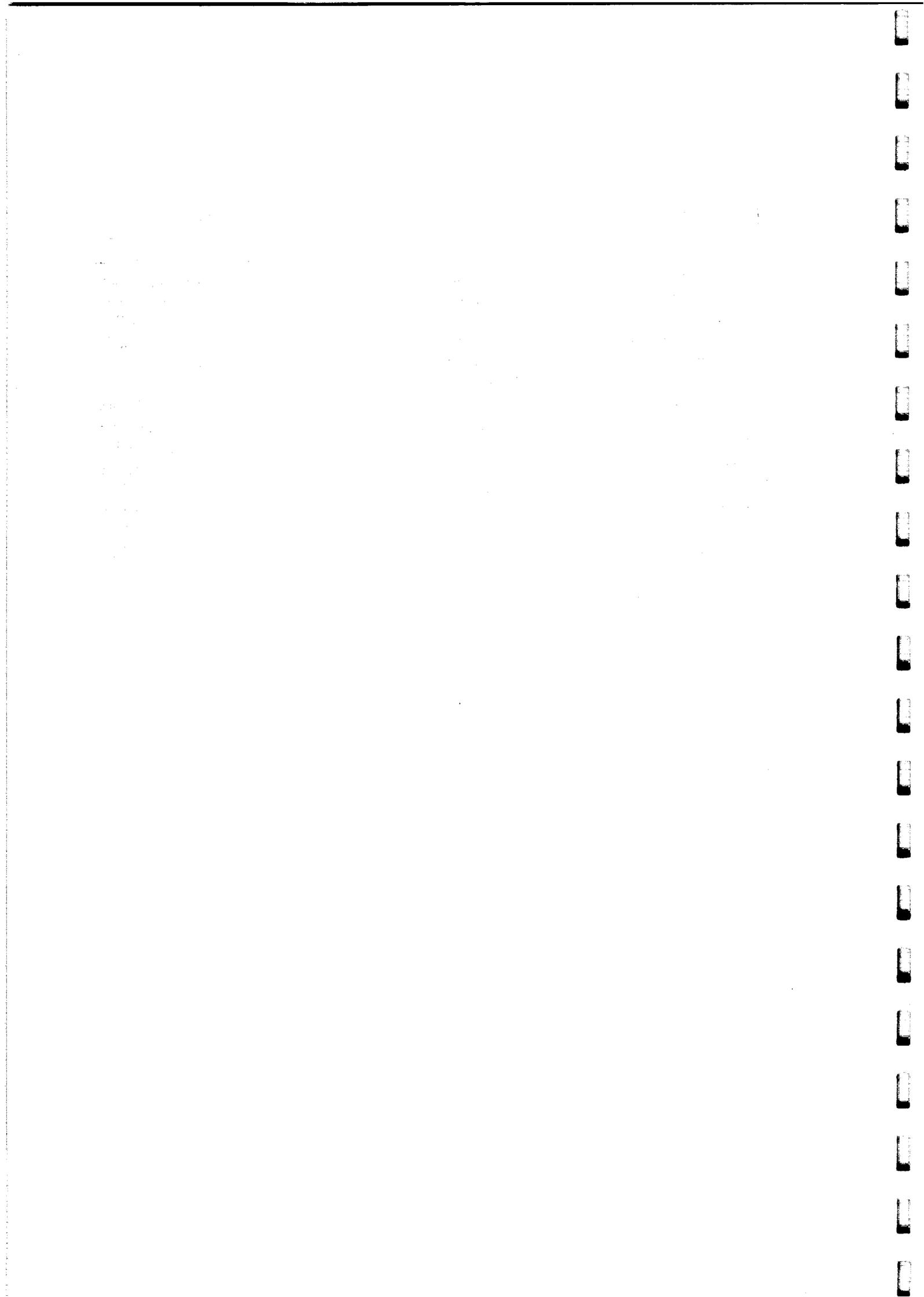
Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert (01.05.1998 bis 30.04.2000, Förderkennzeichen 01LA9865/6). Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Diese danken dem BMBF bestens für die erhaltene Förderung. Die Durchführung des Projekts lag in den Händen von Dr. Michael Denhard, der inzwischen leider nicht mehr der Universität Frankfurt angehört. Aus diesem Grund hat sich die Veröffentlichung verzögert. Der Projektleiter und Koautor möchte aber nicht versäumen, ihm an dieser Stelle sehr für seine engagierte und kooperative Arbeit zu danken.

## Zusammenfassung

Mit Hilfe der Principal Correlation Pattern Analysis (PCPA) können die von verschiedenen Klimaantrieben erzeugten lokalen Zirkulations-, Temperatur und Niederschlagsanomalien auf der Nordhemisphäre in monatlicher Auflösung dargestellt und ursächlich interpretiert werden. Diese Rechnungen wurden für das El Niño Phänomen, die NAO und den quasi 11-jährigen Zyklus der solaren Strahlungsschwankungen durchgeführt. Insbesondere die Untersuchungen zur Wirkung von El Niño auf Europa zeigen, dass die PCPA die Kopplungen eines Prozesses mit dem Klimasystem sehr genau beschreibt und somit die Voraussetzungen schafft, die Wirkungen dieses Klimaantriebs zu modellieren und ihn zur Vorhersage zu nutzen. Erste einfache Vorhersageexperimente für das europäische Klima bestätigen diese Aussage. Obwohl der Anteil der hier diskutierten Signale an der europäischen Klimavariabilität teilweise nur bei einigen Prozent liegt, kann die Bedeutung eines Prozesses in bestimmten Situationen weitaus größer sein, als es dieser Wert suggeriert. Die berechneten Signalstärken sind mittlere Werte, von denen in einzelnen Jahren extreme Abweichungen auftreten können, wie es das Vorhersagebeispiel zum El Niño Phänomen zeigt. Der Erfolg der bisher durchgeführten Analysen begründet die Hoffnung, daß die Überlagerung vieler kleiner Beiträge letztendlich zu einem konsistenten Gesamtbild führt. Um ein vollständiges Vorhersageprodukt zu entwickeln, müssen aber weitere Arbeiten folgen, da hier nur ein kleiner Teil der für das europäische Klima relevanten Prozesse mit Vorhersagepotential erfaßt werden konnten.

In Bezug auf die Signalanalyse der Klimaantriebe konnten einige Fortschritte erzielt werden, die vor allem die Wirkung von El Niño auf Europa betreffen. Dabei spielt die Wechselwirkung zwischen dem Pazifik Nordamerika Muster (PNA), das ein ENSO Ereignis begleitet, und der Nordatlantikoszillation (NAO) eine große Rolle, deren Mechanismen aufgeklärt werden konnten. Darüber hinaus konnten die bekannten nordhemisphärischen Klimawirkungen der NAO auch mit der PCPA dargestellt werden. Dabei hat sich gezeigt, dass das PCP Signalmuster einer einfachen NAO Indexzeitreihe (Luftdruckdifferenz Gibraltar-Island) äquivalent zum Anomalienmuster der Arctic Oszillation (AO) ist. Im Gegensatz zur NAO, die auf den Atlantik konzentriert ist, umspannt die AO einigermaßen symmetrisch die Nordhemisphäre. Die AO ist mit der Stratosphäre gekoppelt, so daß deren Einfluß bei der europäischen Klimavorhersage Berücksichtigung finden muß. Weiterhin konnten die zum quasi 11-jährigen solaren Zyklus kohärenten Klimasignale gefiltert werden. Diese über 10 Perioden mit den Sonnenfleckenvariationen kohärenten Signale stimmen räumlich mit den von Labitzke und van Loon gefundenen Mustern überein, deren Ergebnisse auf der Auswertung von 3 Zyklen beruhen.



# Inhaltsverzeichnis

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>                              | <b>3</b>  |
| <b>2</b> | <b>Methodik der Signalanalyse</b>              | <b>5</b>  |
| 2.1      | Principal Correlation Pattern Analysis (PCPA)  | 5         |
| 2.1.1    | Prinzip der PCPA                               | 5         |
| 2.1.2    | Konstruktion der gefilterten Signale           | 6         |
| 2.1.3    | Güte und Verifikation                          | 9         |
| 2.1.4    | Probleme                                       | 9         |
| 2.2      | Spezielle Hinweise                             | 11        |
| 2.3      | Anwendungsbeispiel                             | 11        |
| <b>3</b> | <b>Klimadaten</b>                              | <b>15</b> |
| 3.1      | Messungen bodennaher Klimavariablen            | 15        |
| 3.2      | Indexzeitreihen der untersuchten Prozesse      | 15        |
| 3.2.1    | ENSO Phänomen                                  | 15        |
| 3.2.2    | Nordatlantikoszillation                        | 16        |
| 3.2.3    | Solare Strahlungsschwankungen                  | 18        |
| <b>4</b> | <b>Nordhemisphärische Signalmuster</b>         | <b>20</b> |
| 4.1      | El Niño  | 20        |
| 4.1.1    | Mittlerer zeitlicher Verlauf eines ENSO-Zyklus | 22        |
| 4.1.2    | Diskussion                                     | 22        |
| 4.1.2.1  | Onset Phase                                    | 22        |
| 4.1.2.2  | Peak Phase                                     | 24        |
| 4.1.2.3  | Decay Phase                                    | 28        |
| 4.1.3    | Einfluß von El Niño auf die NAO                | 31        |
| 4.1.4    | Wertung  | 33        |
| 4.1.5    | Signalmuster                                   | 34        |
| 4.2      | Nordatlantikoszillation                        | 42        |
| 4.2.1    | Diskussion                                     | 42        |
| 4.2.2    | Wertung  | 44        |
| 4.2.3    | Signalmuster                                   | 45        |
| 4.3      | Sonne  | 49        |
| 4.3.1    | Diskussion                                     | 50        |
| 4.3.2    | Wertung  | 51        |
| 4.3.3    | Signalmuster                                   | 51        |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>5 Europäische Klimavorhersage</b>        | <b>61</b> |
| 5.1 El Niño . . . . .                       | 62        |
| 5.2 NAO . . . . .                           | 64        |
| 5.3 Solare Strahlungsschwankungen . . . . . | 64        |
| 5.4 Wertung . . . . .                       | 66        |

# Kapitel 1

## Einleitung

Obwohl die Genauigkeit von Wettervorhersagen in den letzten Jahren kontinuierlich gestiegen ist, zeigen sich doch immer wieder Grenzen, die saisonale Vorhersagen als unmöglich erscheinen lassen. Hat man den Anspruch den genauen Wetterablauf über mehrere Monate hinweg vorherzusagen, so ist dies sicher unmöglich. Allerdings gibt es im Klimasystem Prozesse, die ein besonders langes Vorhersagepotential besitzen. So können beispielsweise die mit dem El-Niño-Phänomen in Zusammenhang stehenden Schwankungen der Meeresoberflächentemperaturen im tropischen Pazifik unter günstigen Umständen bis zu einem Jahr im voraus bestimmt werden. Aufgrund der besonderen Bedeutung des Klimaphänomens El Niño für die Tropen kann dort rechtzeitig vor den zu erwartenden Auswirkungen, wie Trockenheit oder vermehrten Niederschlägen, gewarnt werden. Dies sind Aussagen über die Abweichung des Klimas eines Monats oder einer Jahreszeit vom vieljährigen Mittel, d.h. es wird nur die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten bestimmter Wetterlagen angegeben. Ob und wann eine solche Wetterlage dann tatsächlich eintritt, bleibt allerdings unbestimmt.

Im Vergleich zu den Tropen ist die Klimavorhersage im Bereich von Europa sehr viel schwieriger. Hier ist das Klima sehr variabel, was die Bedeutung einzelner Prozesse für die Gesamtentwicklung reduziert. Selbst wenn sich El Niño auch auf Europa auswirkt, so ist es doch nur ein Phänomen von vielen komplex strukturierten Prozessen. Trotzdem ist die Kenntnis aller potentiellen Einflußfaktoren, auch der kleinen Antriebe, notwendig, da in nichtlinearen Systemen kleine Ursachen zeitweise eine große Wirkung haben können.

Die Realisierung von Klimavorhersagen beginnt also bei der Klimadiagnose, d.h. der Beschreibung der relevanten Ursache-Wirkungs-Mechanismen auf der Grundlage von Beobachtungsdaten. Dabei ist auf eine möglichst hohe räumliche und zeitliche Auflösung der erzeugten Signalstrukturen zu achten, da Klimavorhersagen regionalen Belangen gerecht werden müssen. Das Problem dabei ist, dass mit der Erhöhung der räumlichen und zeitlichen Auflösung ein Anwachsen der beobachteten Variabilität verbunden ist. Fortschritte hin zu einer verwertbaren Klimavorhersage sind deshalb nur über den richtigen Umgang mit kleinen Signalen zu erreichen, die aus Zeitreihen mit hoher Variabilität herausgefiltert werden müssen. Die klassische Statistik bietet dazu keine ausreichenden Möglichkeiten und Anleitungen. Kleine Signal-Rausch-Verhältnisse führen immer zur Ablehnung statistischer Tests unabhängig davon, ob es sich um einen dynamisch relevanten Vorgang handelt oder nicht.

Die Principal Correlation Pattern Analysis (PCPA, Abschnitt 2.1) wurde zur Klimadiagnose unter diesen schwierigen Bedingungen entwickelt. Sie zeichnet sich durch die Bereitstellung umfassender Informationen zur Beurteilung der physikalischen Relevanz gefilterter

Signale aus. Darüber hinaus werden auch nichtlineare Ursache-Wirkungs Mechanismen in optimaler Weise erfasst. Die PCPA bildet die methodische Basis für die im Kapitel 4 gezeigten Signalstrukturen. Im Teil 5 dieses Berichts wird eine Bewertung des Vorsagepotentials der gefundenen Strukturen vorgenommen.

## Kapitel 2

# Methodik der Signalanalyse

### 2.1 Principal Correlation Pattern Analysis (PCPA)

Um kleine Signale in einem stark verrauschten Datenkollektiv erkennen zu können, ist eine effektive Signal-Rausch-Trennung notwendig. Dazu wird in der Regel eine Zerlegung der Zeitreihenvarianz in verschiedene Anteile vorgenommen, die relevanten Anteile bestimmt und von Rest separiert. Ein klassisches Beispiel für diese Vorgehensweise ist die Kohärenzanalyse (z.B. [42]). Diese Methode zerlegt die zu untersuchenden Zeitreihen in ihre Frequenzanteile und bestimmt die kohärenten Teile. Die Trennung von Signal und Rauschen kann nur dann mit hoher Genauigkeit durchgeführt werden, wenn die gewählten Basisfunktionen zu den physikalischen Ursachen der Signale passen. Die Kohärenzanalyse ist am erfolgreichsten, wenn das zu untersuchende System periodische oder zumindest zyklische Prozesse enthält. Ist das nicht der Fall, so ist sie inadequat. Dynamische Komponenten nichtlinearer Systeme können so komplex sein, dass ihre Zeitstruktur nicht durch ein paar Schwingungsmoden darstellbar ist. Werden trotzdem Zyklen detektiert, so sind sie oft nicht zeitlich stabil.

Ein allgemeingültigeres Verfahren zur Rekonstruktion dynamischer Strukturen aus Zeitreihen ist die Singular System Analysis (SSA, [4, 45]). Sie besteht aus einer Phasenraumrekonstruktion mittels Delaykoordinaten und einer anschließenden Hauptachsentransformation dieses Delayraumes. Bei der Einbettung durch Delay-Koordinaten werden zeitliche Versetzungen des Ausgangssignals  $\{Y_t\}_{t=1,N}$  verwendet und zu einem Vektor zusammengefaßt.

$$\mathbf{y}_m^T(t) = (Y_t, Y_{t-\tau}, \dots, Y_{t-(m-1)\tau}). \quad (2.1)$$

Dabei ist  $\tau$  ein ganzzahliges Vielfaches des Meßzeitintervalls  $\Delta t$  und  $m$  die Dimension des rekonstruierten Zustandsvektors  $\mathbf{y}_m^T(t)$ . Es entsteht eine Zerlegung der Ausgangszeitreihe in  $m$  verkürzte Zeitreihen, die einen  $m$  dimensionalen Rekonstruktionsraum aufspannen. Eine EOF-Transformation dieses Raumes führt zu einer optimalen Beschreibung der darin enthaltenen Strukturen und damit zu einer weitgehenden Trennung der verschiedenen dynamischen Anteile in der Zeitreihe. Die Vielzahl der möglichen Rekonstruktionsräume mit  $m \ll N$ , wobei  $N$  die Zeitreihenlänge ist, bildet die Grundlage zur Berechnung der Principal Correlation Patterns (PCP).

#### 2.1.1 Prinzip der PCPA

Die folgenden Überlegungen werden anhand von zwei einzelnen Zeitreihen  $X(t)$  und  $Y(t)$  durchgeführt, deren Zusammenhang geklärt werden soll. Die Verallgemeinerung auf Zeitrei-

henfelder ist möglich, aber wegen der dabei entstehenden hochdimensionalen Rekonstruktionsräume und den damit verbundenen numerischen Problemen nicht unbedingt anzuraten. Bei den hier durchzuführenden Untersuchung räumlich hochauflösender Datensätze verschiedener Klimavariablen werden deshalb räumliche und zeitliche Freiheitsgrade getrennt behandelt. Die Abbildung 2.1 zeigt schematisch das Verfahren zur Berechnung der PCPA. Zunächst wird mit jeder beteiligten Zeitreihe eine SSA, bestehend aus einer Delayraumrekonstruktion der Dimension  $m$  und einer EOF-Transformation, durchgeführt. Alle Komponenten der entstehenden Räume, die im Weiteren mit  $\mathbf{x}$  und  $\mathbf{y}$  bezeichnet werden, bildet eine mögliche Zustandsvariable des jeweiligen dynamischen Systems. Besteht ein Zusammenhang zwischen den Zeitreihen, so befinden sich in  $\mathbf{x}$  und  $\mathbf{y}$  Unterräume, deren dynamische Strukturen gekoppelt sind. Die zu diesen Unterräumen gehörenden Komponentenzitreihen  $x_i$  und  $y_j$  ( $i, j \in 1, \dots, m$ ) sind miteinander korreliert. Im Rahmen einer PCPA werden die relevanten Komponentenzitreihen mit Hilfe verschiedener Korrelations- und Informationsmasse identifiziert und von der Restvariabilität getrennt. Nach der Rücktransformation der ausgesuchten Komponenten entstehen je zwei gefilterte Signale  $Xf_k^{m,s}(t)$  und  $Yf_k^{m,s}(t)$ , die den gesuchten Zusammenhang beschreiben. Der Index  $k$  symbolisiert das bei der Auswahl der Komponenten verwendete Korrelationsmaß und  $s$  ist die gewählte Signifikanzschwelle für einen akzeptierten Zusammenhang. Ziel der PCPA ist es, das Verfahren  $k$  und die Parameter  $s$  und  $m$  so zu wählen, daß der Zusammenhang zwischen den Zeitreihen  $X(t)$  und  $Y(t)$  optimal von der Restvariabilität getrennt wird. Wie dies geschehen kann und was dabei zu beachten ist beschreiben die folgenden Abschnitte.

### 2.1.2 Konstruktion der gefilterten Signale

Die Filterwirkung der PCPA entsteht durch die Auswahl eines Teils der rekonstruierten dynamischen Variablen und die anschließende Rücktransformation des durch diese Variablen definierten Eigenraumes. Der Vergleich der Rekonstruktionsräume  $\mathbf{x}$  und  $\mathbf{y}$  findet komponentenweise statt, wobei eine Komponente des einen Systems, die Basiskomponente, mit allen Komponenten des anderen Systems verglichen wird. Alle Kombinationen mit signifikanter Korrelation werden selektiert. Um alle möglichen Zusammenhänge erfassen zu können, werden verschiedene Korrelationsmaße benutzt. Die PCPA unterteilt sich somit in verschiedene Verfahren. Die linearen Zusammenhänge zwischen den Komponentenzitreihen werden in der Kreuzkovarianzmatrix  $\mathbf{C}$  zusammengefaßt. Das Symbol  $\mathbf{D}$  in der Abbildung 2.1 steht für die normierte Quadratische Summe der Rangplätze,  $\mathbf{K}$  bezeichnet die Kendallsche Rangkorrelation und  $\mathbf{I}$  ist die Transinformation.  $\mathbf{D}$ ,  $\mathbf{K}$  und  $\mathbf{I}$  sind Matrizen, welche die entsprechenden Korrelationsmasse aller Komponentenzitreihen von  $\mathbf{x}$  und  $\mathbf{y}$  enthalten. Wegen der Beschränkung der Rangkorrelationskoeffizienten auf monotone Zusammenhänge wird auch die Transinformation als allgemeines Maß für die Assoziation zwischen Zeitreihen benutzt.

Um die signifikant korrelierten Komponentenzitreihen zu identifizieren, werden in den Verfahren (2), (4) und (5) feste Schwellwerte gesetzt, deren Überschreiten einen relevanten Zusammenhang anzeigen. In allen Fällen muß eine Signifikanz von mindestens 99.7% erreicht werden. Das Setzen von einzelnen Schwellwerten gewährleistet aber nicht unbedingt eine der Aufgabenstellung entsprechende optimale Filterung. Deshalb besteht in der PCPA die Möglichkeit, diese Schwellwerte während der Filterung zu variieren. Im allgemeinen gilt: je höher die Schwelle  $s$ , desto stärker ist die Filterwirkung. Die Verwendung einer variablen Schwelle hätte wenig Sinn, wenn nicht eine spezielle Verifikation der gefilterten Signale erfolgen würde. Da eine höhere Schwelle immer die Signale mit hoher Autokorrelation bevorzugt,

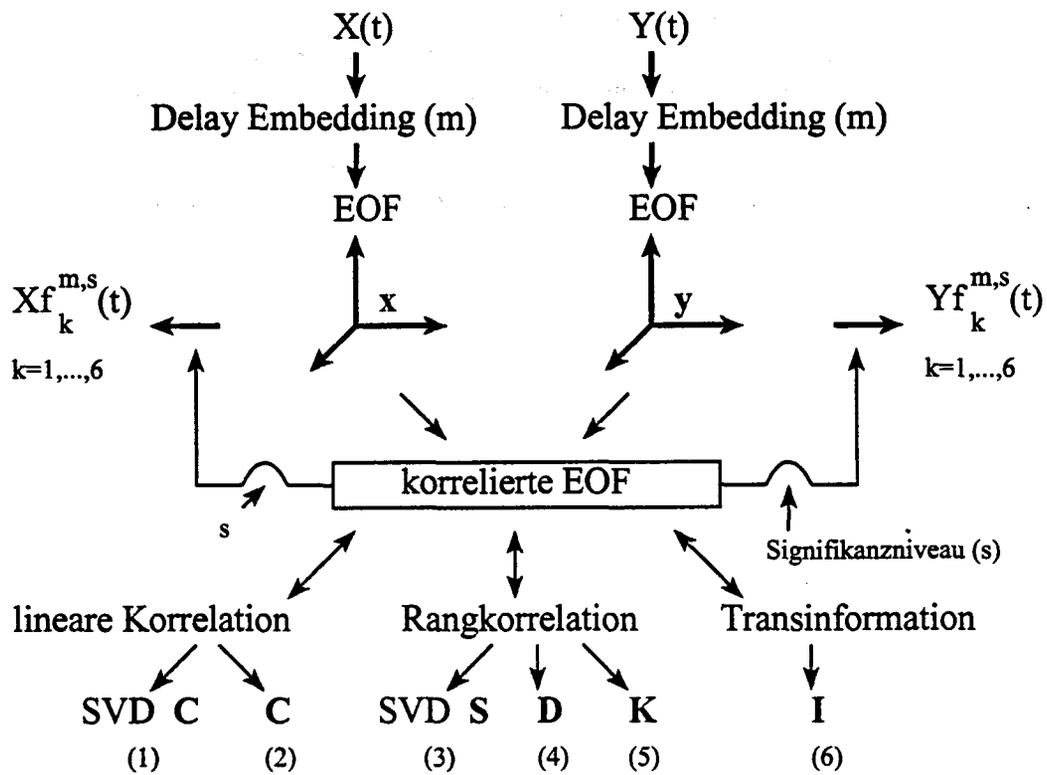


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung des Verfahrens der Principal Correlation Pattern Analysis (PCPA).  $X(t)$  und  $Y(t)$  sind die Ausgangszeitreihen.  $Xf_k^{m,s}(t)$  und  $Yf_k^{m,s}(t)$  sind die gefilterten Signale. Dabei ist  $m$  die Dimension der Delayräume,  $k$  bezeichnet das verwendete Korrelationsmaß und  $s$  ist die verwendete Signifikanzschwelle.

entsteht die Gefahr der Filterung von Zusammenhängen ohne realen Hintergrund. Details zur Verifikation finden sich im nächsten Abschnitt. In den Verfahren (2), (4) und (5) wird neben einer festen auch mit einer variablen Signifikanzschwelle  $s$  gerechnet. Alle anderen Verfahren werden nur mit variablem Schwellwert  $s$  ausgewertet.

Die Verfahren (1) und (3) enthalten einen weiteren Analyseschritt. Vor der Festlegung des Signalraumes werden die Korrelationsmatrizen mit Hilfe der Singular Value Decomposition (SVD, z.B. [42]) diagonalisiert. Die führende Hauptkomponente dieser Diagonalmatrix definiert die Komponenten von  $x$  und  $y$  mit der höchsten Kovarianz und legt so einen ersten Signalraum fest. Aber auch die Hinzunahme weiterer Hauptkomponenten der SVD Transformation ist möglich, was in der PCPA durch die Verwendung einer variablen Signifikanzschwelle erreicht wird. Insgesamt entspricht das Verfahren (1) einer Canonical Correlation Analysis (CCA, Verfahren nach BP [1, 3]) der rekonstruierten Delayräume. Im Prinzip kann das Verfahren (1) auch als MSSA des Zeitreihenfeldes  $(X(t), Y(t))$  aufgefaßt werden, wobei allerdings zeitliche und räumliche Freiheitsgrade getrennt behandelt werden. Gleiches wie mit  $C$  wird mit der Matrix  $S$  im Verfahren (3) durchgeführt, die die Rangkovarianzen nach Spearman enthält. Die Verwendung der Rangkovarianzen führt im Vergleich zu (1) möglicherweise zu einer anderen Beurteilung der Zusammenhänge. Ist dies der Fall werden sich die Signalräume und damit auch die Filterwirkung von (1) und (3) unterscheiden.

### 2.1.3 Güte und Verifikation

Die Güte einer Signal-Rausch-Trennung mit der PCPA wird durch die Qualität der dynamischen Rekonstruktion bestimmt. Deren Genauigkeit hängt vom Verhältnis der maximal möglichen Rekonstruktionsdimension  $m$  zu den tatsächlichen Dimensionen  $d_x$  und  $d_y$  der dynamischen Systeme ab. Das zugehörige mathematische Theorem fordert  $m \geq 2d$ . Im Klimasystem ist  $m$  immer sehr viel kleiner als  $d$ , da es als räumlich ausgedehntes System im Prinzip unendlich viele Freiheitsgrade besitzt und eine endlichdimensionale Beschreibung der Klimadynamik mit  $d < \infty$  bisher noch nicht gefunden werden konnte [39]. Da  $d$  in der Regel nicht bekannt ist oder gar nicht erreicht werden kann, wird das Verfahren der PCPA mit verschiedenen Rekonstruktionsdimensionen  $m < N/2$  durchgeführt. Dies bedeutet aber auch, dass die Prozesse in den Zeitreihen nur teilweise rekonstruiert werden können, was die Signal-Rausch-Trennung begrenzt.

Besteht nun tatsächlich ein Zusammenhang zwischen den Zeitreihen  $X(t)$  und  $Y(t)$ , so müssen zwei Fälle unterschieden werden. Entweder gehören beide Variablen einem einzigen dynamischen System an oder eine der Variablen, hier  $X(t)$ , wirkt als externer Antrieb auf das dynamische System der anderen Variable, hier  $Y(t)$ . Da im Fall der externen Steuerung einer Dynamik keine Rückwirkung des Systems auf den externen Antrieb erfolgt, wird bei der PCPA nur die Korrelation zwischen der gefilterten Systemvariablen  $Yf_k^{m,s}$  und dem externen Antrieb  $X$  maximiert. D.h. das Ziel ist, aus  $Y(t)$  das Signal herauszufiltern, das dem externen Antrieb am meisten entspricht. Gehören beide Variablen zum gleichen dynamischen System, so sind die Korrelationen zwischen  $Yf_k^{m,s}$  und  $X$  sowie  $Xf_k^{m,s}$  und  $Y$  gemeinsam zu maximieren. Dabei ist zu beachten, dass durch die Verwendung der Rangkorrelation und der Transinformation auch nichtlineare Veränderungen durch das dynamische System erkannt werden können.

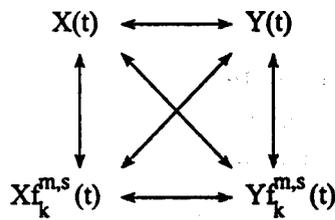
Je nach der dynamischen Situation und den vorliegenden Hypothesen über den Zusammenhang, kann die PCPA gezielt eingesetzt werden. Die Abbildung 2.2 faßt die Fallunterscheidung und die dabei betrachteten Korrelationen in einem Schaubild zusammen. Es ist wichtig zu bemerken, daß die Korrelation zwischen den gefilterten Signalen  $Yf_k^{m,s}(t)$  und  $Xf_k^{m,s}(t)$  allein für die Bestimmung der Parameter  $m$  und  $s$  der PCPA kein gutes Optimierungskriterium liefert, da fast immer, auch ohne daß tatsächlich ein realer Zusammenhang besteht, signifikant korrelierte Komponentenzitreihen gefunden werden können.

### 2.1.4 Probleme

Die Identifikation der Zusammenhänge zwischen den Komponentenzitreihen stellt die Korrelationsanalyse vor zwei Probleme. Durch die Delay-Einbettung in Kombination mit der EOF Transformation können zum einen Komponentenzitreihen mit hoher Autokorrelation entstehen, zum anderen sind die Daten in den Komponentenzitreihen nicht notwendigerweise normalverteilt, selbst wenn die ursprüngliche Zeitreihe diese Eigenschaft besitzt. In beiden Fällen entstehen Probleme bei der Signifikanzprüfung der Korrelationsmaße.

Um das Problem der fehlenden Normalverteilung etwas abzumildern, werden neben der linearen Korrelation auch Rangkorrelationen berechnet, die unabhängig von der Verteilung der Ausgangsdaten sind. Die Rangkorrelation hat gegenüber der linearen Korrelation zudem den Vorteil, auch monotone nichtlineare Zusammenhänge in vollem Umfang erkennen zu können.

Die Erzeugung gefilterter Signale, die nur aufgrund hoher Autokorrelationen in den Komponentenzitreihen zustande kommen, können auf verschiedene Arten verhindert werden (sie-



Hypothesen über den Zusammenhang  $X \leftrightarrow Y$

---

maximiere:

Externer Antrieb  $X$

$$Y_k^{m,s} \leftrightarrow X$$

gleiches dynamisches System:  $Y_k^{m,s} \leftrightarrow X \ \& \ Y \leftrightarrow X_k^{m,s}$

---

$k=1, \dots, 6$  / optimiere  $s$  und  $m$

Abbildung 2.2: Kriterien zur Korrelationsoptimierung bei der PCPA. Zu unterscheiden ist die Wirkung eines externen Antriebs auf die Systemdynamik (EF/S) und die systeminterne Wechselwirkung (S/S). Die Korrelationen zwischen den Ausgangszeitreihen und den gefilterten Signalen werden durch Variation der Rekonstruktionsdimension  $m$ , der Signifikanzschwelle  $s$  sowie der anschließenden Auswahl des den Zusammenhang am besten beschreibenden Korrelationsverfahrens  $k$  optimiert.

he z.B. [6]). Diese Methoden sind aber entweder nicht aussagekräftig genug oder für die Anwendung innerhalb der PCPA nicht geeignet. Letzteres trifft besonders auf die Monte Carlo Tests zu, bei denen eine große Anzahl von zufällig veränderten Zeitreihen erzeugt werden muß, um die Signifikanz von Korrelationen zu bewerten. Deshalb wird in der PCPA auf zusätzliche Signifikanztests verzichtet.

Es ist daher nicht auszuschließen, daß Komponentenzitreihen nur aufgrund ihrer hohen Autokorrelation als miteinander assoziiert eingestuft werden und keinen real existierenden Zusammenhang repräsentieren. Die PCPA ist deshalb als Instrument zur Signal-Rausch-Trennung einzustufen, das einen Zusammenhang zwischen Zeitreihen optimal filtert. Eine Entscheidung, ob ein gefundenes PCP real ist oder nicht, kann nur auf der Grundlage der physikalische Plausibilität und der Generalisierungsfähigkeit des Zusammenhangs getroffen werden. Das relevante Kriterium ist, ob sich der Zusammenhang modellieren und auf unabhängige, nicht analysierte Daten anwenden läßt.

Allerdings bietet die PCPA die Möglichkeit die gefilterten Signale genau zu untersuchen, um diejenigen Fälle zu separieren, die aufgrund der hohen Autokorrelation der gefilterten Signale suspekt erscheinen. Generell gilt: je komplexer die zeitliche Struktur dieses Signals ist, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit für einen zufälligen Zusammenhang. Denn es ist nahezu unmöglich eine Reihe von Zufallszahlen, die komplexeste aller denkbaren Zeitstrukturen, per Zufall genauso noch einmal zu erzeugen. Die Filterung zweier korrelierter Zeitreihen mit komplexer Zeitstruktur unterstützt deshalb die Relevanz eines Zusammenhangs.

## 2.2 Spezielle Hinweise

In dieser Arbeit wird die PCPA ausschließlich mit der linearen Korrelation und dem nichtparametrischen Korrelationskoeffizient nach Kendall betrieben (Verfahren 2 und 5). Dadurch lassen sich sowohl lineare als auch monotone nichtlineare Zusammenhänge erkennen. Weitergehende Konzepte der Feststellung von Assoziationen, wie z.B. die Transformation, können wegen der Kürze der Klimazeitreihen (95 bis 130 Werte) nicht verwendet werden. Eine detaillierte Beschreibung der PCPA findet man in [5].

Die Klimasignalanalyse erfordert die Verarbeitung von räumlich strukturierten, hochdimensionalen Datenfeldern. Dazu können im Verfahren der PCPA (siehe Abbildung 2.1) die Zeitreihen  $X(t)$  und  $Y(t)$  durch die entsprechenden Feldgrößen ersetzt werden. Bei der Erstellung der Rekonstruktionsräume  $x$  und  $y$  ersetzt die MSSA die SSA. Die anderen Analyseschritte bleiben unverändert. Problematisch ist nur die hohe Dimensionalität der entstehenden Delayräume (Produkt der zeitlich versetzten mit den räumlichen Freiheitsgraden; hier bis zu 20000), was zu Problemen bei der Hauptkomponentenanalyse führt. Deshalb werden die Zeitreihen der verschiedenen externen Antriebe  $X(t)$  mit jeder Gitterpunktszeitreihe der Klimadatenfelder direkt in Beziehung gesetzt. Die räumlichen Strukturen der Signale werden durch Kombination der Einzelrechnungen gewonnen.

## 2.3 Anwendungsbeispiel

Die Abbildung 2.3 zeigt ein Beispiel für die Wirkungsweise der PCPA. Dargestellt ist eine PCPA (Verfahren 2) der Wirkung des ENSO (El Niño/Southern Oscillation) Phänomens auf das bodennahe Luftdruckfeld der Nordhemisphäre im Januar. Direkte Korrelationen des Southern Oscillation Index (hier SOI-EN3.4, siehe Abschnitt 3.2.1) mit den einzelnen Gitterpunktszeitreihen liefern die wesentlichen mit dem El-Niño-Phänomen assoziierten Anomalien im Pazifik und den Subtropen des Westatlantiks sowie dem subtropischen Asien. Mit Hilfe der PCPA kann dieses Bild soweit ergänzt werden, daß jetzt auch die anderen im Klimarauschen verborgenen Signale zum Vorschein kommen. Die Gesamtheit aller Anomalien ermöglicht nun eine dynamische Interpretation des Signalmusters. Beispielsweise wird die Trennungslinie der mit El Niño verknüpften positiven Luftdruckanomalie über dem nordamerikanischen Kontinent und dem pazifischen Druckfall durch die Gebirgskette der Rocky Mountains verursacht. Über Europa zeigt sich in der PCPA deutlich eine Schwächung des meridionalen Luftdruckgradienten als Teil einer vom Pazifik ausgehenden Wellenstruktur (Details siehe Abschnitt 4.1). Der Anteil der gefilterten Signale (Abbildung 2.3c) an der lokal beobachteten Luftdruckvariabilität bestätigt, daß die PCPA eine effektive Signal-Rausch-Trennung bewirkt.

In diesem Bericht erfolgt die Anwendung der PCPA in der eindimensionalen Version. Zeitreihen an den Gitterpunkten von Feldern werden separat analysiert. Die räumlichen Signalstrukturen ergeben sich dann aus der Zusammensetzung der Einzelergebnisse. Es entsteht daher die Frage nach der Interpretationsfähigkeit des so erzeugten Musters. Dies betrifft z.B. die unterschiedliche Ausprägung der Anomalien in den Extremzuständen der SO, den El Niño und La Niña Ereignissen. Ist diese Asymmetrie in den PCPs wiederzufinden?

Die Abbildung 2.4 zeigt eine Komposit Studie des ENSO Signals für den Winter. Die mittleren Anomaliefelder des bodennahen Luftdrucks enthalten nur Jahre mit El Niño oder La Niña Ausprägung. Die Auswahl erfolgt über den SOI-EN3.4 Index (siehe Abschnitt 3.2.1),

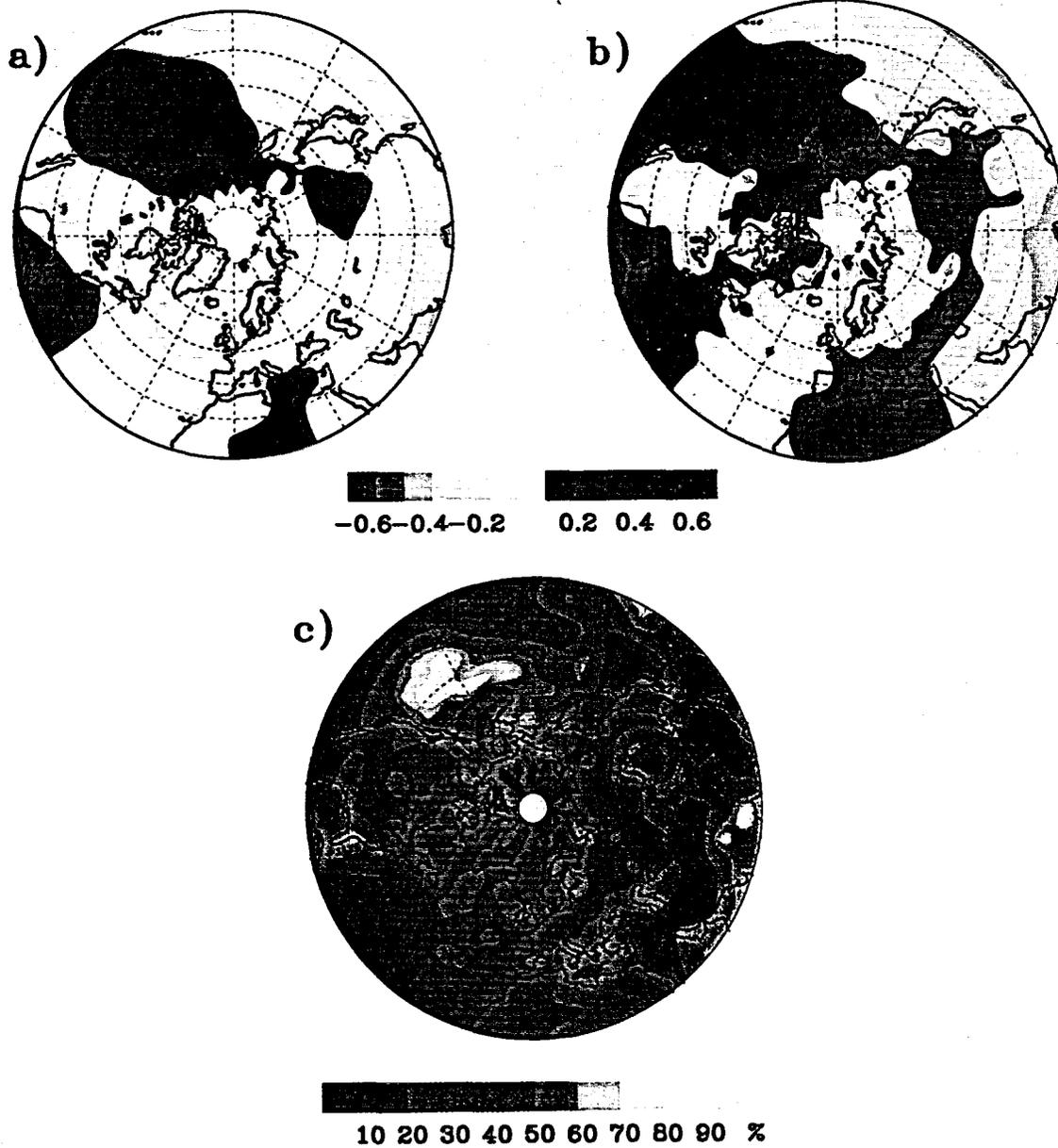


Abbildung 2.3: Lineare Korrelation des SOI-EN3.4 mit dem bodennahen Luftdruckfeld im Januar für a) ohne Filterung und b) nach Entfernung der nichtkorrelierten Varianz mit der PCP Analyse. Es wurde das Verfahren (2) mit variabler Signifikanzschwelle eingesetzt. Das Bild c) zeigt den Anteil der gefilterten Signale an der lokal beobachteten Luftdruckvariabilität.

der hier zur Charakterisierung des ENSO Phänomens verwendet wird. Dieser Index muß den Wert +1 oder -1 überschreiten, was in 20 Wintern für El Niño und in 21 Wintern für La Niña der Fall ist.

Es zeigen sich Unterschiede in den Signalmustern der Komposits, wobei in einzelnen Fällen Anomalien in einem Extrem auftreten im anderen nicht. Die unterschiedliche Intensität des PNA-Musters zwischen El Niño und La Niña Zuständen deutet auf Nichtlinearitäten der mit ENSO verknüpften Telekonnektionen hin [17]. Das mit der PCPA gefundene winterliche Signalmuster ähnelt dem Differenzmuster El Niño - La Niña und stimmt in den wesentlichen Grundzügen mit den in der Literatur diskutierten Signalen überein. Eine Ausnahme sind die von der PCPA identifizierten Signale über dem indischen Subkontinent.

Eine mögliche Asymmetrie zwischen El Niño und La Niña Anomalien ist im räumlichen Korrelationsmuster selbst nicht sichtbar, da die PCPA das Differenzsignal der Komposits erfaßt. Das PCP beschreibt nur den Grad des Zusammenhangs zwischen der Indexzeitreihe des ENSO Phänomens  $X(t)$  und den gefilterten Klimazeitreihen an den Gitterpunkten  $YF_i(t)$  ( $i = \text{alle Gitterpunkte}$ ), die sowohl El Niño als auch La Niña Zustände umfassen. Die Information über die Asymmetrie geht bei der Filterung aber auch nicht verloren. Sie steckt in den gefilterten Zeitreihen und könnte durch eine an die Filterung anschließende Komposit-Bildung sichtbar gemacht werden. Dies hätte zusätzlich den Vorteil der Rauschreduzierung im Vergleich zu den Komposit-Bildern der ungefilterten Daten. Die Modellierung des Zusammenhangs zwischen der Indexzeitreihe des ENSO Phänomens  $X(t)$  und den Zeitreihen des Korrelationsmusters  $YF_i(t)$  liefert dann den Grad an Nichtlinearität, der zur Erklärung der Anomalien in den Extremzuständen von ENSO benötigt wird.

Ein Vergleich der Abbildung 2.4 mit der Abbildung 2.3b) zeigt darüber hinaus, wie wichtig die zeitliche Auflösung bei der Signalsuche ist. Die Bildung des Wintermittels bewirkt nicht nur eine Rauschreduktion, auch die gesuchten Signale werden teilweise zerstört. Dies geschieht in Gebieten, in denen im Mittelungszeitraum Signale mit unterschiedlichen Vorzeichen auftreten. Wie das Beispiel zeigt, wird durch die Mittelung die Detektion der Wirkungen des El-Niño-Phänomens auf das europäische Klima verhindert.

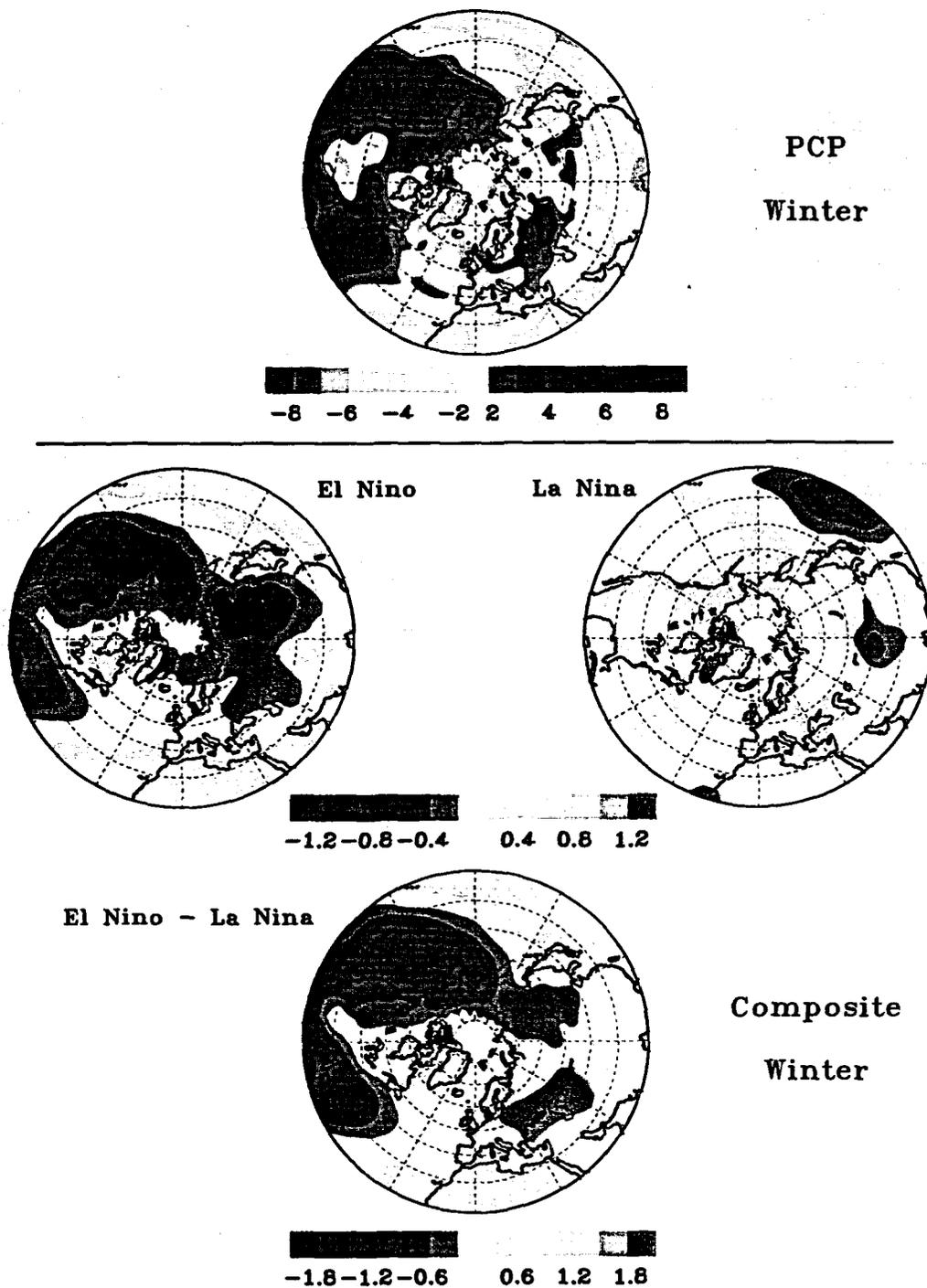


Abbildung 2.4: Komposite-Studie des ENSO-Signals im Winter. Das Bild ganz oben zeigt das ENSO PCP des bodennahen Luftdrucks im Wintermittel (Dez. - Feb.). Dargestellt ist der Kendallsche Korrelationskoeffizient zwischen dem SOI-EN3.4 und den Gitterzeitreihen des bodennahen Luftdrucks. Darunter sind die mittleren Anomalien in den Extremzuständen der SO und deren Differenz dargestellt. Zur Definition der Komposits siehe Text.

## Kapitel 3

# Klimadaten

### 3.1 Messungen bodennaher Klimavariablen

Zur Beschreibung des Klimazustands in der Nähe der Erdoberfläche werden nordhemisphärische Gitterpunktdatensätzen des bodennahen Luftdrucks (SLP), der Temperatur und des Niederschlags verwendet. Die Datensätze stammen alle von der Climate Research Unit der Universität in East Anglia [25, 2] (<http://www.cru.uea.ac.uk:80/cru/data/>). Der Niederschlagsdatensatz wurde von Mike Hulme für die Jahre von 1900 bis 1998 bereitgestellt. Für die Signalstudien wird die  $2.75^\circ \times 3^\circ$  Grad Auflösung dieses Datensatzes benutzt. Der SLP Datensatz überdeckt den Zeitraum 1873 bis 1995 und hat eine Auflösung von  $10^\circ \times 5^\circ$  Grad. Der Temperaturdatensatz umfaßt die Zeitspanne von 1891 bis 1998 auf einem  $5^\circ \times 5^\circ$  Grad Gitter.

Von den genannten Datensätzen werden nur solche Zeitreihen verwendet, die für die angegebenen Zeitspannen weniger als 10% an Datenlücken aufweisen. Da sich Datenlücken bei den Delayraumrekonstruktionen der PCPA besonders negativ auswirken, wurden die vorhandenen Lücken durch multiple Regression mit benachbarten Gitterzeitreihen gefüllt. Liefert die multiple Regression keinen befriedigenden Schätzwert (Wert innerhalb der  $3\sigma$  Grenzen der lückenhaften Zeitreihe), so werden Klimamittel gebildet. Ein lückenloser Luftdruckdatensatz kann für die Nordhemisphäre (ab  $20^\circ$  nördlicher Breite) flächendeckend erzeugt werden. Die Belegung des Temperatur und des Niederschlagsdatensatzes zeigt die Abbildung 3.1.

### 3.2 Indexzeitreihen der untersuchten Prozesse

#### 3.2.1 ENSO Phänomen

Das El-Niño-Phänomen (EN) ist mit der Southern Oscillation (SO), das ist die Luftdruckdifferenz zwischen den Meßstationen auf Tahiti und in Darwin, verknüpft, weshalb man vom EN-SO Phänomen spricht. Da Messungen der Meeresoberflächentemperatur in den verschiedenen Teilen des tropischen Pazifiks erst ab etwa der Mitte des 20. Jahrhunderts eine ausreichende räumliche Abdeckung besitzen, wird hier zur Charakterisierung des El-Niño-Phänomens der SO-Index (SOI) benutzt. Die lineare Korrelation zwischen dem SOI und der Anomalie der Meeresoberflächentemperatur im Bereich von  $5N-5S$  und  $170W-120W$ , dem El Niño 3.4 SST Index, beträgt auf Monatsbasis für den Zeitraum von 1950 bis 1999  $0.72$ . Da atmosphärische Parameter einen höheren Rauschanteil als die SST's aufweisen, wurde mit dem SOI und der El

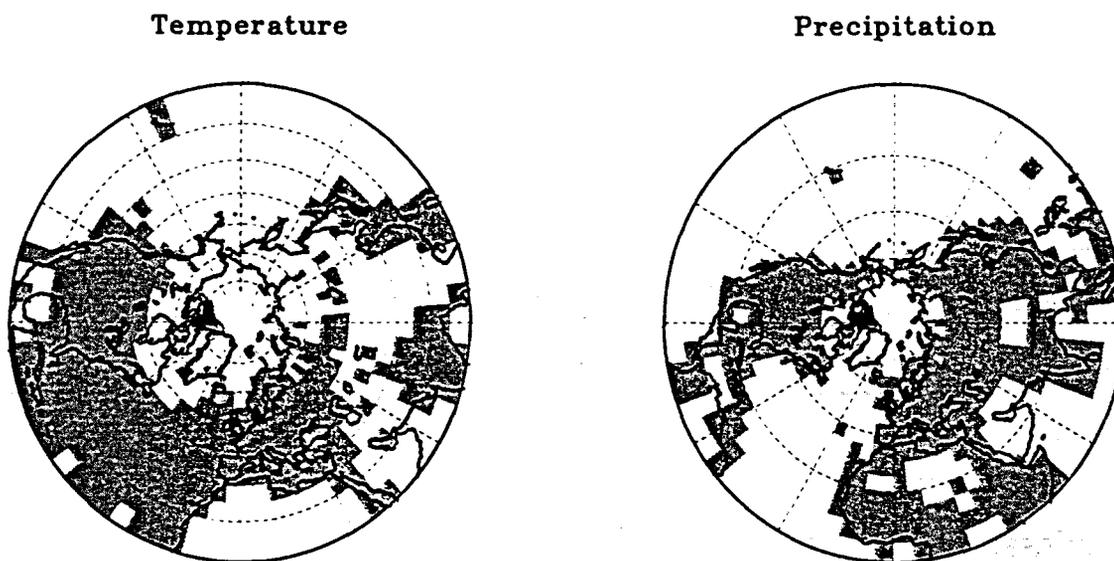


Abbildung 3.1: Datenbelegung (graue Schattierung) von Temperatur (1891-1998) und Niederschlag (1900-1998) auf nordhemisphärischem  $5^\circ \times 5^\circ$  Grad Gitter.

Niño 3.4 SST Indexreihe eine Principal Correlation Pattern Analysis (PCPA, siehe Abschnitt 2.1) durchgeführt. Dabei wird die Variabilität aus dem SOI entfernt, die nicht mit dem Ozean Phänomen El Niño assoziiert ist. Das Ergebnis ist der SOI-EN3.4 Index (Abbildung 3.2) dessen Korrelation mit den El Niño 3.4 SST Anomalien 0.93 beträgt. Nimmt man an, daß der im Zeitraum von 1950 bis 1999 gefundene Zusammenhang zwischen dem SOI und den SST's im tropischen Pazifik stationär ist, beschreibt der SOI-EN3.4 das El-Niño-Phänomen auch vor dieser Zeit, so daß eine sehr gute Dokumentation der Ereignisse im tropischen Pazifik zurück bis ins Jahr 1866 erreicht werden kann.

### 3.2.2 Nordatlantikoszillation

Die Nordatlantikoszillation (NAO) ist durch die Intensität und Lage des Islandtiefs und des Azorenhochs gegeben, die im gegenseitigen Wechselspiel zeitlich variieren. Die Ausprägung der Druckzentren hat weitreichende Folgen für das Klima in Europa, in Nordamerika und auf dem Atlantik. In der Literatur werden verschiedene Formen von Indexzeitreihen zur Beschreibung der NAO verwendet. Im einfachsten Fall wird die Druckdifferenz zwischen Meßstationen im Bereich von Islandtief und Azorenhoch berechnet, wobei für das Islandtief immer die Station Stykkisholmur als Indikator dient. Für das Azorenhoch dagegen werden alternativ die Stationen Ponta Delgada (Azoren) [23], Lissabon [21] oder Gibraltar [24] verwendet. Die Abbildung 3.3 zeigt das Wintermittel der NAO (Dez bis Feb) als Druckdifferenz zwischen Island und Gibraltar.

Die Verwendung fester Meßorte zur Definition der NAO hat den Nachteil, daß die Stärke der Druckgebilde Azorenhoch und Islandtief nicht in ihren Zentren gemessen wird. Lageänderungen der Druckgebilde und Schwankungen in der Stärke haben bei Verwendung von festen Meßstationen den gleichen Effekt auf den Index und können nicht voneinander getrennt werden. Es existieren deshalb auch Indexreihen der NAO, bei denen die Festlegung

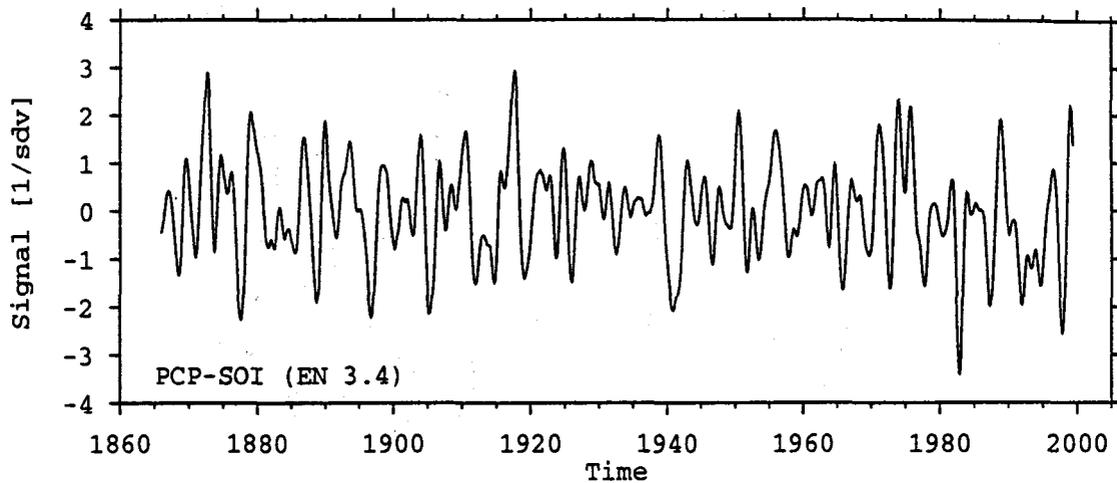


Abbildung 3.2: Zeitreihe des SOI-EN3.4 von 1866 bis 1999 in monatlicher Auflösung. Diese Zeitreihe ist das Ergebnis einer PCPA Filterung des Southern Oscillation Index (SOI) mit den SST's des tropischen Pazifiks für den Zeitraum nach 1950. Die Werte des SOI-EN3.4 vor 1950 sind unter der Annahme eines zeitlich stationären Zusammenhangs zwischen dem SOI und den SST's rekonstruiert.

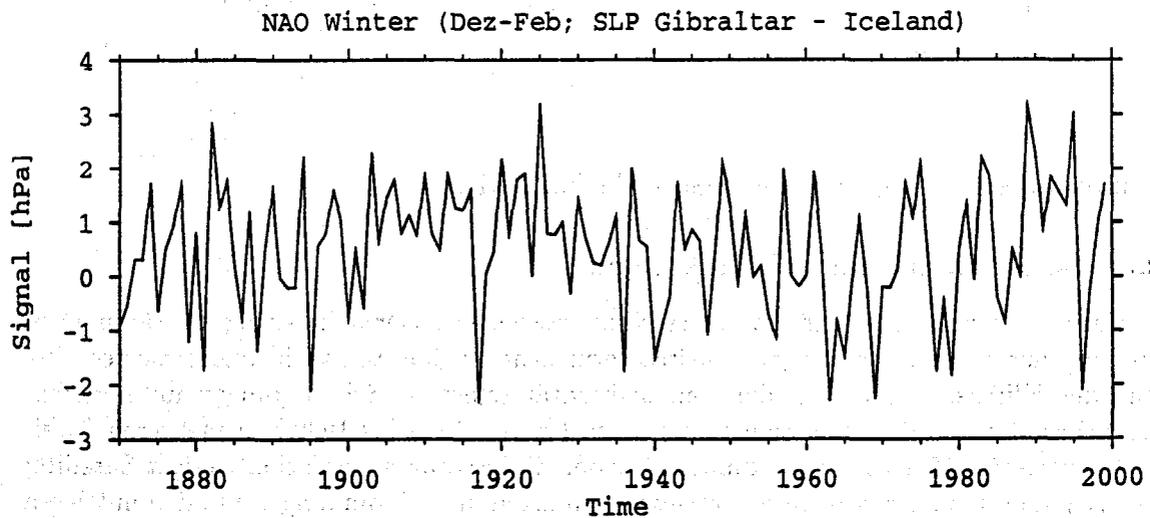


Abbildung 3.3: NAO als Zeitreihe der Luftdruckdifferenz zwischen den Stationen Gibraltar und Stykkisholmur (Island) in monatlicher Auflösung.

### Solarer - Antrieb

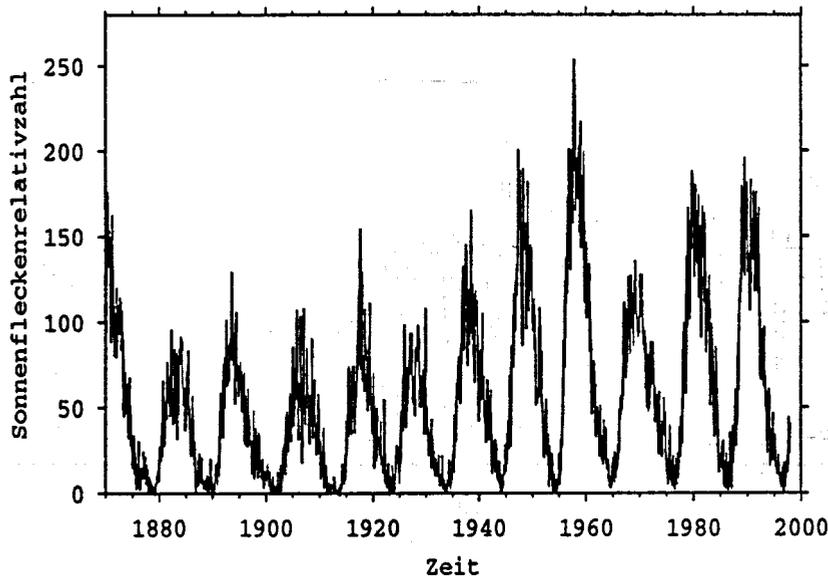


Abbildung 3.4: Variation der Sonnenfleckenrelativzahlen in monatlicher Auflösung.

der räumliche Lage und der Stärke der Druckzentren der Indexbildung vorangeht [32, 13].

Im Hinblick auf die Klimavorhersage für Deutschland und Europa ist festzustellen, daß alle genannten Indizes der NAO ein sehr breitbandiges Spektrum nahe dem des weißen Rauschens aufweisen, so daß keine bevorzugte Zeitskala sichtbar ist. Die Vorhersage der NAO ist deshalb äußerst schwierig. Es besteht allerdings die Hoffnung, zumindest gewisse Teile der NAO vorhersagen zu können. Dazu zählt der Anteil einer QBO ähnlichen Variation (QBO = Quasi Biennial Oscillation) sowie die relativ stark vertretene dekadische Variabilität im Zeitbereich von etwa 7 bis 12 Jahren. Die Frage nach der Vorhersagbarkeit der NAO ist aber weiterhin ungeklärt, so daß hier ein erheblicher Forschungsbedarf besteht. Die mit Hilfe der PCPA gefundenen Wirkungsmuster der NAO besitzen also kein direktes Vorhersagepotential. Allerdings können Wechselwirkungen der NAO mit anderen Einflußfaktoren die Vorhersagbarkeit des europäischen Klimas beeinflussen (siehe Abschnitt 5.1).

### 3.2.3 Solare Strahlungsschwankungen

Die solare Einstrahlung ist der Motor des Klimageschehens. Der Jahresgang der räumlichen Verteilung der solaren Strahlungsintensität verursacht ein jahreszeitlich differenziertes Verhalten des Klimas. Aber auch die Sonnenaktivität selbst ist Schwankungen unterworfen. Diese Schwankungen der „Solarkonstanten“ wurden von 1978 bis 1989 von mehreren Satelliten (Nimbus 7, SMM=Solar Maximum Mission, ERBS=Earth Radiation Budget Satellite; siehe [31]) gemessen. Im Zeitraum der Messungen lagen die Schwankungen um den mittleren Wert der solaren Einstrahlung von etwa  $1370 \text{ W m}^{-2}$  bei etwa  $1 \text{ W m}^{-2}$ . Foukal und Lean [8] haben gezeigt, daß diese Schwankungen gut mit den im gleich Zeitraum erfolgten Änderungen der Sonnenfleckenrelativzahlen (SRN, [19, 47, 46]) übereinstimmen. Damit wird die Hypothese unterstützt, daß die SRN als Index für die Anomalien der einfallenden Strahlungsintensität verwendet werden können.

Andere Hypothesen zur Bestimmung der von der Sonne kommenden Strahlung wurden von [12], [30], [11] sowie [20] vorgeschlagen. Schönwiese et. al. [36] haben diese und noch weitere von anderen Autoren aufgestellte Indexreihen mit jahreszeitlich und regional aufgelösten Temperaturreihen über lineare Korrelations und Regressionsrechnungen verglichen. Sie kommen zu dem Schluß, daß die Sonnenfleckenrelativzahlen, und damit auch der von Foukal und Lean angegebene Zusammenhang, am ehesten die Realität wiedergibt. Die Zahl der Sonnenflecken wird von einem etwa 11-jährigen Zyklus dominiert, der im hier betrachteten Zeitraum der letzten etwa 100 Jahre gut repräsentiert ist, wie die Abbildung 3.4 zeigt.

## Kapitel 4

# Nordhemisphärische Signalmuster

Die dynamische Interpretation der europäischen Klimavariabilität erfolgt im Rahmen einer nordhemisphärischen Signalanalyse verschiedener möglicher Antriebsmechanismen. Diese sind das El-Niño-Phänomen, die Nordatlantikoszillation (NAO), die solaren Strahlungsschwankungen (quasi-11-jähriger Zyklus der Sonnenflecken) und der Vulkanismus. Zur Signalanalyse werden die Principal Correlation Patterns (PCP) zwischen den Indexzeitreihen der Antriebsmechanismen und jeder Gitterpunktszeitreihe der verschiedenen Klimadatensätze ermittelt. Die räumlichen Muster werden aus den Ergebnissen der Einzelanalysen zusammengestellt. Dabei ermöglicht der hohe Grad der Signal-Rausch-Trennung der PCPA die Darstellung der Signalmuster in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung.

Die monatlichen PCPA-Signalmuster befinden sich am Ende eines jeden Abschnitts. Dargestellt ist der Wert des Kendallschen Korrelationskoeffizienten zwischen der Indexzeitreihe des Antriebs und den gefilterten Gitterpunktszeitreihen der Klimavariablen, der die Ähnlichkeit dieser Zeitreihen in einem nichtparametrischen Sinne bewertet, d.h. ohne die Annahme eines expliziten Regressionsmodells. Die gefilterten Gitterpunktszeitreihen sind durch die PCPA vom Klimarauschen weitgehend befreit, so daß sich im Vergleich zur direkten Korrelationsanalyse eine höhere Signifikanz des Zusammenhangs ergibt. Je dunkler die Farbe im Muster, desto signifikanter ist der Zusammenhang. Die Amplitude des Signals kann diesen Abbildungen nicht entnommen werden.

### 4.1 El Niño

Das El-Niño-Phänomen gehört zu den am besten untersuchten internen Effekten des Klimasystems [34, 18]. Bekanntlich äußert es sich in episodischen Erwärmungen der tropischen Ozeane, insbesondere des Oberflächenwassers im tropischen Ost- und Zentralpazifik. Diese Erwärmung wird durch eine Abschwächung des Aufquellens von kaltem Tiefenwasser im Bereich des Humboldtstroms und eine Kelvinwelle hervorgerufen, die oberflächennahes warmes Wasser vom West- in den Ostpazifik transportiert. Gekoppelt ist El Niño mit Anomalien der atmosphärischen Walker- und Hadley-Zirkulation. Außerdem besteht eine hohe negative Korrelation mit der Southern Oscillation (SO), die durch die Luftdruckdifferenz Tahiti - Darwin (Australien) gekennzeichnet wird. Zusammenfassend spricht man daher vom ENSO Phänomen. Während nun die tropischen Auswirkungen mittlerweile gut bekannt sind, ist noch immer fraglich, in welcher quantitativen Ausprägung ENSO auch die außertropischen Klimaregionen beeinflusst. Einen Überblick zum theoretischen Verständnis und zu den dyna-

mischen Erklärungsversuchen bzw. Modellierungen der außertropischen El-Niño-Wirkungen geben Trenberth et al. [38].

Die wohl prominenteste mit El Niño in Zusammenhang stehende außertropische Zirkulationsanomalie ist das winterliche Pazifische North American Pattern (PNA [48]). Dieses Muster ist mit negativen Luftdruckanomalien im Bereich des Aleutentiefs und dem Südosten Nordamerikas sowie mit höherem Luftdruck zwischen diesen beiden Druckgebilden während El Niño verknüpft. Das gesamte winterliche El-Niño-Muster kann aber nicht allein mit der PNA Anomalie erklärt werden, sondern es sind zumindest zwei weitere Grundmuster beteiligt, das West Pazifische (WP) Muster und das Tropical Northern Hemisphere (TNH) Muster (siehe z.B. [38, ?]).

Europäische El-Niño-Signalmuster für verschiedene Klimaelemente werden unter anderem von van Loon und Rogers [41], Rogers [35], Halpert und Ropelewski [14], Hurrell [22] sowie Fraedrich und Müller [10] angegeben. In den sogenannten Komposit-Studien werden mittlere Anomaliefelder der Klimavariablen erzeugt, die nur Jahre mit El-Niño- oder La-Niña-Ausprägung enthalten. Da die Signale sehr klein im Vergleich zum Klimarauschen sind werden i.a. Jahreszeitenmittel und Geopotentialanomalien höherer Luftschichten untersucht. Fraedrich [10] findet eine Verstärkung des meridionalen bodennahen Luftdruckgradienten über Europa im Winter während El Niño, was eine Zyklonalisierung der Großwetterlage zur Folge hat [9]. Dies erzeugt entsprechende Signalmuster in der Temperatur und im Niederschlag. Neben den winterlichen El-Niño-Signalen wird eine Erwärmung Südwesteuropas zu Beginn des Frühjahres als signifikante El-Niño-Anomalie angegeben [14]. Der Einfluß von El Niño auf den tropischen Atlantik gilt als gesichert (z.B. Enfield und Mayer [7]). In den SST-Daten des tropischen Atlantik und in verschiedenen Datensätzen in Südeuropa zeigt sich ein verzögerter Einfluß des EL-Niño-Phänomens im März und April des auf die maximalen SSTA im tropischen Pazifik folgenden Jahres.

Der Mangel an Informationen über die EL-Niño-Wirkung auf Europa hat zwei Gründe. Zum einen ist das mittlere Signal relativ klein, zum anderen birgt die übliche Untersuchung saisonaler Mittel die Gefahr, daß sich nicht nur das Rauschen, sondern auch die gesuchten Signale wegmitteln. Dies kann geschehen, wenn im Mittelungszeitraum sowohl positive als auch negative Anomalien im gleichen Gebiet auftreten. ENSO-Signale in monatlicher Auflösung sind in der Literatur nur selten zu finden, da sie aufgrund der hohen Klimavariabilität in den mittleren und hohen Breiten in der Regel als nicht signifikant bewertet werden. Da die PCPA relativ unabhängig von der Stärke der nicht zum Signal gehörenden Restvariabilität in den untersuchten Zeitreihen ist, überwindet sie dieses Signifikanzproblem (siehe Abschnitt 2.1). Es zeigt sich, daß die Erhöhung der zeitlichen Auflösung einen entscheidenden Beitrag zur Klärung der Wirkung von El Niño auf Europa ist. Insbesondere wird das Zusammenwirken des PNA-Musters mit der NAO in seiner ursächlichen Beschaffenheit deutlich.

Die Analyse des ENSO-Signals beginnt im Abschnitt 4.1.1 mit der qualitativen Beschreibung der verschiedenen Phasen eines extremen ENSO Ereignisses, die aufgrund der Anomalien der Meeresoberflächentemperaturen (SSTA) im tropischen Ostpazifik vorgenommen wird. Die beiden folgenden Abschnitte enthalten die Beschreibung und Interpretation der ENSO-Signalmuster in den bodennahen Beobachtungsdaten (Abschnitt 4.1.2) und die Kartendarstellungen der Signalmuster (Abschnitt 4.1.5). Die Beschreibung und Interpretation findet anhand von Grafiken und Verlaufsdigrammen statt, die die wesentlichen Anomalienmuster qualitativ wiedergeben. Details können den Kartendarstellungen entnommen werden.

#### 4.1.1 Mittlerer zeitlicher Verlauf eines ENSO-Zyklus

In den meisten Fällen verläuft ein EL-Niño- oder La-Niña-Phänomen in verschiedenen Phasen ab. Im Kern besteht es aus einer Onset, einer Peak und einer Decay Phase. Bei der Festlegung des Beginns und der Dauer der einzelnen Phasen orientieren sich Harrison und Larkin [16] an den Meeresoberflächentemperaturen (SST) im zentralen tropischen Pazifik. Diese Einteilung wird auch hier als Referenzzeitskala verwendet. Die Anomalien in den anderen Regionen unterscheiden sich zum Teil erheblich vom Referenzverlauf. Die Abbildung 4.1 beschreibt qualitativ die wichtigsten mit einem EL-Niño-Phänomen verknüpften Anomalien der Meeresoberflächentemperatur in den tropischen Ozeanen.

#### 4.1.2 Diskussion

Es läßt sich grundsätzlich feststellen, daß die außertropischen Anomalienmuster des ENSO-Phänomens starken räumlichen und zeitlichen Variationen unterliegen. Dies ist im wesentlichen eine Folge der Wechselwirkung der tropischen SST-Anomalien mit der sich im Verlauf eines Jahres stetig ändernden mittleren Zirkulation. Die PCPA-Signalmuster für Bodenluftdruck (SLP), Temperatur und Niederschlag werden in den folgenden Unterabschnitten im Detail diskutiert. Zur Interpretation werden auch Analysen der mit El Niño in Zusammenhang stehenden Anomalien in den Meeresoberflächentemperaturen (siehe auch Abbildung 4.1) und des bodennahen Windfeldes von Harrison und Larkin [16] herangezogen. Der prinzipielle Ablauf eines El-Niño-Ereignisses, wie es in den hier präsentierten Analysen dargestellt wird, ist in der Abbildung 4.5 zusammengefaßt.

##### 4.1.2.1 Onset Phase

Im Frühjahr und Sommer eines El Niño Jahres bildet sich die charakteristische Verteilung der SSTA im tropischen Pazifik mit einer Warmwasseranomalie im Ostpazifik und einer Kaltwasseranomalie im Bereich von Australien und Indonesien. Ein erstes großräumiges Signalmuster in den bodennahen Klimavariablen findet man im Mai der Onset Phase eines El-Niño-Phänomens (siehe Abschnitt 4.1.5). Man beobachtet negative Anomalien des Luftdrucks (SLPA) im Ostpazifik von den Subtropen bis in die mittleren Breiten aufgrund der warmen SST's in diesem Bereich. Dazu assoziiert ist ein zonales Band erhöhten Luftdrucks, das sich von Nordostamerika bis in den Ostatlantik erstreckt. Signifikant sind auch die negativen SLPA über Grönland und ein Gebiet mit SLP-Reduzierung über Nordostasien. Über Nordamerika beobachtet man eine Erwärmung während in Europa und Nordafrika Abkühlungen zu finden sind.

**Interpretation:** Das Band positiver Luftdruckanomalien im Atlantik bewirkt eine Nordverlagerung des atlantischen Sommerhochs. Zusammen mit der Verstärkung des polaren Tiefdrucks werden warme Luftmassen aus dem tropischen Westatlantik und aus dem Ostpazifik nach Nordamerika geführt. Zum Ausgleich werden polare Luftmassen über Ost- und Südeuropa bis nach Afrika geleitet. Neben dem markanten Temperaturmuster erzeugt diese Zirkulationsanomalie mehr Niederschlag im Westen und weniger Niederschlag im Osten Nordamerikas sowie erhöhte Niederschlagsmengen vom Mittelmeerraum bis nach Asien hinein. Die leichte Luftdruckerhöhung über West- und Nordeuropa sorgt dort für weniger Niederschlag.

| Phase | Zeitraum          | Beschreibung   |
|-------|-------------------|--|
| Onset | Mar(0) - Jun(0)   | Warme SSTA vor südamerikanischer Küste.<br>Kalte SSTA bei Australien.  |
| Peak  | Jul(0) - Dec(0)   | Verstärkung der warmen und kalten SSTA aus der Onset Phase.<br>Ausweitung der warmen SSTA bis etwa zur Datumsgrenze.<br>Maximum der Anomalien zwischen Oktober und Dezember. |
| Decay | Jan(+1) - Apr(+1) | Rückbildung der Anomalien im Pazifik.<br>Aufbau der atlantischen SSTAs ab Januar mit Maximum im April.   |

|    |     | Meeresoberflächentemperaturen |                          |                            |   |                            |                            |
|----|-----|-------------------------------|--------------------------|----------------------------|---|----------------------------|----------------------------|
|    |     | Indischer Ozean               | Chines. Meer             | nördlicher Pazifik         | tropischer Pazifik                                  | Sargassosee Golf v. Mexiko | tropischer Atlantik        |
| 0  | Mai | <input type="checkbox"/>      | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>   | K <input type="checkbox"/> W                        | <input type="checkbox"/>   | <input type="checkbox"/>   |
| 0  | Jun | <input type="checkbox"/>      | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>   | K <input type="checkbox"/> *W                       | <input type="checkbox"/>   | <input type="checkbox"/>   |
| 0  | Jul | <input type="checkbox"/>      | <input type="checkbox"/> | K <input type="checkbox"/> | K W *W  | <input type="checkbox"/>   | <input type="checkbox"/>   |
| 0  | Aug | <input type="checkbox"/>      | <input type="checkbox"/> | K <input type="checkbox"/> | *K W W  | <input type="checkbox"/>   | <input type="checkbox"/>   |
| 0  | Sep | W                             | <input type="checkbox"/> | K <input type="checkbox"/> | *K W W  | <input type="checkbox"/>   | <input type="checkbox"/>   |
| 0  | Okt | W                             | <input type="checkbox"/> | K <input type="checkbox"/> | K W *W  | <input type="checkbox"/>   | <input type="checkbox"/>   |
| 0  | Nov | W                             | W                        | K <input type="checkbox"/> | K W *W  | <input type="checkbox"/>   | <input type="checkbox"/>   |
| 0  | Dez | W                             | W                        | <input type="checkbox"/>   | K W *W  | <input type="checkbox"/>   | <input type="checkbox"/>   |
| +1 | Jan | <input type="checkbox"/>      | W                        | <input type="checkbox"/>   | K W W   | K                          | <input type="checkbox"/>   |
| +1 | Feb | <input type="checkbox"/>      | W                        | <input type="checkbox"/> K | K W W   | K                          | W <input type="checkbox"/> |
| +1 | Mar | <input type="checkbox"/>      | W                        | <input type="checkbox"/> K | <input type="checkbox"/> W <input type="checkbox"/> | K                          | W W                        |
| +1 | Apr | <input type="checkbox"/>      | W                        | <input type="checkbox"/> K | <input type="checkbox"/>                            | K                          | W W                        |
| +1 | Mai | <input type="checkbox"/>      | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>   | <input type="checkbox"/>                            | K                          | W W                        |
| +1 | Jun | <input type="checkbox"/>      | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>   | <input type="checkbox"/>                            | <input type="checkbox"/>   | W W                        |

West Ost      West Z Ost      West Ost

W = warm      K = kalt      \* = hoch signifikant

Abbildung 4.1: Anomalien der Meeresoberflächentemperaturen (SSTA), die dem El-Niño-Phänomen zugeordnet werden können. Mit 0 wird das Jahr des El Niño Ereignisses und mit +1 das Folgejahr gekennzeichnet.

Im Juni beobachtet man eine Verschiebung der negativen SLPA vom Ostpazifik in den Zentralpazifik. Im Atlantik verlagert sich das Band positiver Anomalien aus den mittleren Breiten nach Süden. Der Luftdruck steigt im Bereich des indischen Subkontinents. Das Mai-Temperaturmuster bleibt in seiner räumlichen Struktur in etwa erhalten, schwächt sich aber ab. Auch das Niederschlagsmuster in den mittleren Breiten ist im Mai und im Juni ähnlich. Allerdings wandelt sich das Niederschlagsmuster in den Tropen und Subtropen der Kontinente zu mehr Trockenheit. Diese Entwicklung setzt sich in den folgenden beiden Monaten fort und ist charakteristisch für einen EL-Niño-Sommer.

#### 4.1.2.2 Peak Phase

##### Juli und August

Im Juli und August ist das für einen El-Niño-Sommer typische Anomalienmuster voll ausgeprägt. Das Luftdruckmuster ist zweigeteilt: Negative Anomalien im Pazifik stehen positive Anomalien in den anderen Gebieten gegenüber, wobei in den polaren Breiten Luftdruck erhöhungen dominieren. Dadurch entsteht eine Abschwächung der meridionalen Luftdruckgegensätze auf der Nordhemisphäre. Die mittleren Druckgebilde werden abgeschwächt bzw. nach Süden verlagert. Hinzu kommt eine mit den SSTA im tropischen Pazifik verbundene Abschwächung der Walkerzirkulation. Beide Mechanismen zusammen verursachen die signifikante Niederschlagsabnahme in den nördlichen Tropen und Subtropen der Kontinente während des El-Niño-Sommers.

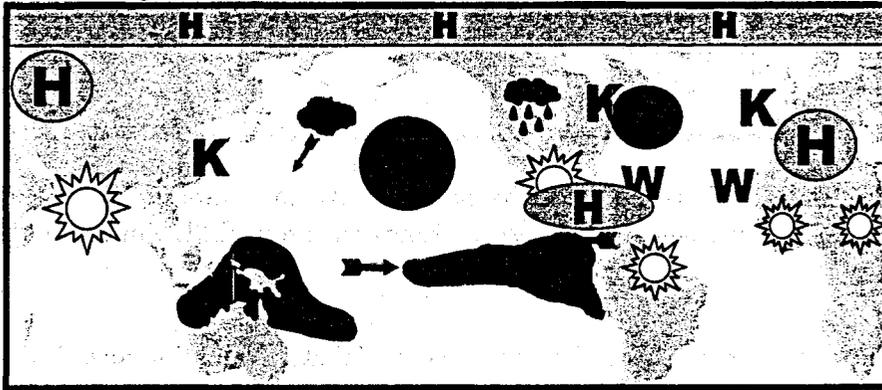
Auffällig sind auch die negativen Temperaturanomalien an der Ostküste Asiens. Sie stehen in Zusammenhang mit einer nordpazifischen Kaltwasseranomalie im Konvergenzbereich der kalten Oya-Schio-Meereströmung mit dem warmen Wasser des aus Süden kommenden Kuro-Schio (siehe [16]). Durch die Luftdruckänderungen im Pazifik, mit einer kleinen Zelle erhöhten Luftdrucks im Westen und der dominierenden negativen Anomalie im Ost- und Zentralpazifik, entsteht ein Strömungsmuster mit Abschwächung des pazifischen Sommerhochs und der an seinem Westrand nach Norden gerichteten mittleren Winde. Dadurch wird weniger tropische Luft nach Norden transportiert und die Konvergenzlinie der kalten und warmen Meereströmungen im Westpazifik verändert, so dass der Oya-Schio mit seinem kalten Wasser weiter als normal nach Süden vordringen kann. Insgesamt entstehen so die beobachteten kalten Luft- und Wasseranomalien an der Ostküste Asiens und im zentralen Nordpazifik.

##### September und Oktober

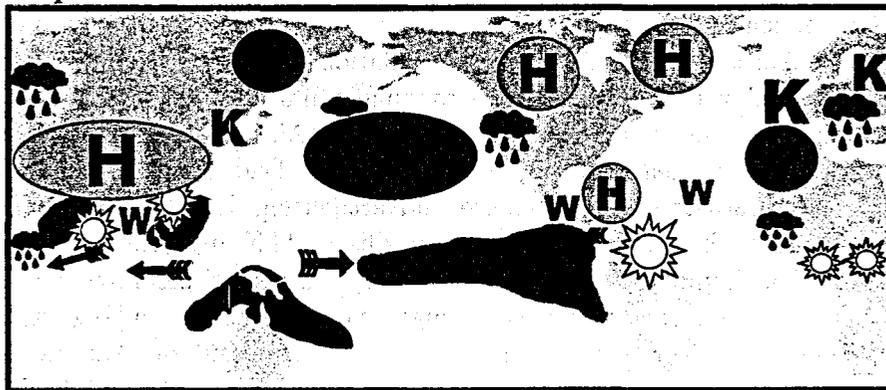
Die Kaltwasseranomalie im Nordpazifik erreicht ihre maximale Ausprägung zwischen August und September, verliert im Oktober und November aber schnell an Stärke und tritt ab Dezember nicht mehr signifikant in Erscheinung. Ursache für diesen Vorgang ist ein markantes und folgenreiches Anomalienmuster, das den September und Oktober bestimmt und auch für den weiteren Verlauf des El-Niño-Phänomens eine bedeutende Rolle spielt. Mit der Umstellung von der Sommer- auf die Winterzirkulation wandert die Innertropische Konvergenzzone (ITK) nach Süden und hinterlässt eine hochsignifikante positive SLPA in den subtropischen Breiten des asiatischen Kontinents. Dies bedeutet ein verfrühtes Ende des SW-Monsuns, was besonders im Niederschlagsmuster sichtbar ist. Dazu die folgende Interpretation der Abbildung 4.3:

**Interpretation:** Die Schwache Sommerzirkulation der Nordhemisphäre wirkt sich insbeson-

Juli / August



September / Oktober



| Wasser | Niederschlag | Wind | Luftdruck | Lufttemperatur |
|--------|--------------|------|-----------|----------------|
| warm   | trocken      |      | H         | W warm         |
| kalt   | feucht       |      | -         | K kalt         |

Abbildung 4.2: Zusammenfassung der mit Hilfe der PCPA gefilterten und von Harrison und Larkin (1998) gefundenen ENSO-Anomalien von Juli bis Oktober. Die gefilterten Signalmuster von Luftdruck, Temperatur und Niederschlag finden sich im Abschnitt 4.1.5.

September / Oktober

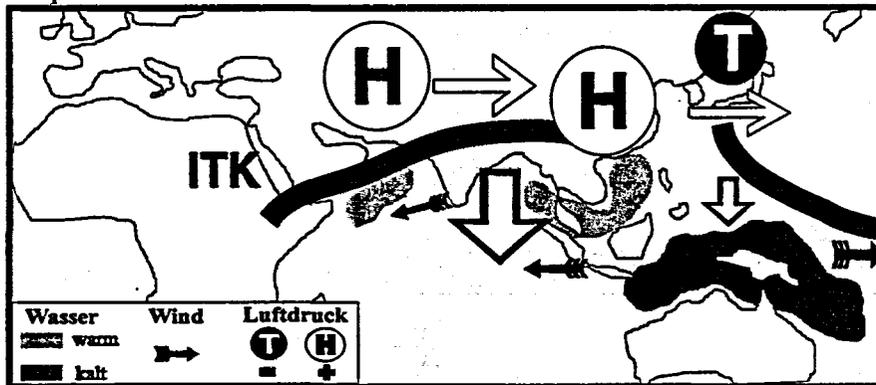


Abbildung 4.3: Schematische Darstellung der beobachteten Anomalien während des Rückzugs der asiatischen und westpazifischen Innertropischen Konvergenzzone (ITK) im September und Oktober.

dere zur Zeit des Übergangs von der Sommer- zur Winterzirkulation aus. Im Bereich von Asien wird dadurch der Rückzug der ITK auf die Südhemisphäre vorzeitig eingeleitet. Neben dem ausgeprägten Band positiver SLPA über dem subtropischen Asien entstehen warme SSTA sowie Nordostwindanomalien im arabischen Meer [16]. Die Windanomalien reichen bis in den Indischen Ozean und zeigen das Ende der normalerweise vorherrschenden Südwestströmung an. Bei diesem Vorgang spielt auch die mit El Niño verknüpfte Abschwächung der Walker-Zirkulation eine Rolle. Die im Australisch-Indonesischen Bereich vorhandene Kaltwasseranomalie führt zu einer Abschwächung der konvektiven Aktivität und verringert dadurch auch die Absinkbewegung der Luftmassen über dem Indischen Ozean vor der Ostküste Afrikas. Dadurch sinkt der Luftdruck in den Tropen und fördert die beobachtete Südverlagerung der ITK über Asien. Im Gegensatz zum asiatischen Teil gerät die westpazifische ITK auf ihrem Rückzug nach Süden direkt in den Einfluß der mit El Niño verknüpften Kaltwasseranomalien vor Australien. Da die ITK die Konvektion beschleunigt, schiebt sie auf ihrem Weg nach Süden die kalten Wassermassen vor sich her und beginnt sie aufzulösen (zur Analyse der SST siehe [16]). Die Wechselwirkung der ITK mit dem „kalten“ Wasser beeinflusst die tropische Zonalzirkulation sowohl im Pazifik als auch im indischen Ozean (Verstärkung der Ostwindanomalien im Indischen Ozean). Bereits im Juli und August sind Westwindanomalien im tropischen Pazifik vorhanden, die für den Transport warmen Wassers in den Ostpazifik und die Bildung der dortigen Warmwasseranomalien sorgen. Diese Windanomalien werden durch die Wechselwirkung der ITK mit der Kaltwasseranomalie zusätzlich verstärkt und erreichen deshalb im September und Oktober ihre maximale Intensität. Dadurch wird die warme SSTA im Ostpazifik weiter intensiviert.

Im SLPA-Muster des Oktobers ist bereits deutlich der Einfluß der Winterzirkulation zu erkennen. Negative SLPA beginnen die hohen Breiten zu dominieren. Die zu kühlen Temperaturen vor der Ostküste Asiens werden durch wärmere Luft abgelöst und die vorherrschende Trockenheit des Sommers weicht vermehrten Niederschlägen. Anomal hohe Niederschlagsmengen findet man in einem Band vom Mittelmeerraum bis zum Ural, in Afrika sowie an der Westküste Nordamerikas.

## November und Dezember

Charakteristisch für diese beiden Monate ist die Intensivierung der nordhemisphärischen Zirkulation im Bereich der Ozeane bei gleichzeitiger Abschwächung des zentralasiatischen Winterhochs. Dies manifestiert sich in den negativen SLPA der polaren Breiten und über Asien sowie den positiven SLPA im Bereich der ozeanischen Hochdruckzonen. Dieses bodennahe Anomaliemuster deutet auf eine intensivierte stratosphärische Zirkulation. So bringen beispielsweise Perlwitz und Graf [33] ein ähnliches Muster im 500 hPa Niveau mit einem starken polaren stratosphärischen Wirbel in Verbindung.

Die Schwächung und Südverlagerung des asiatischen Winterhochs erzeugt ein ausgeprägtes Signal im Niederschlag, der in den Randbereichen dieses Druckgebildes deutlich zunimmt. Dazu assoziiert sind die Warmluftanomalien über Indien sowie im Bereich des Ostchinesischen und Japanischen Meeres. Die Anomalie über Indien korreliert mit den dort beobachteten positiven SLPA. Die warmen und feuchten Verhältnisse an der Ostküste Asiens entstehen durch eine Verminderung des Transports von Luftmassen polaren Ursprungs nach Süden, der an der Ostflanke des zentralasiatischen Hochdruckgebietes normalerweise vorherrscht.

Die schwache Ausprägung des asiatischen Winterhochs fördert auch die Entstehung der positiven SLPA im Westpazifik, die aufgrund der jahreszeitlich bedingten Umstellung der Zirkulation diesen Bereich erobern. Die im Sommer und Herbst den Pazifik dominierenden negativen SLPA werden dadurch in den Ostpazifik verdrängt und wandern dabei über den mittelamerikanischen Kontinent hinweg in den Golf von Mexiko. Das Übergreifen der negativen Luftdruckanomalien aus dem Pazifik in die Karibik erzeugt eine Vorstufe des Pazifik Nordamerika Musters (PNA).

**PNA-Muster:** Während des gesamten Winters kann das sogenannte Pazifik-Nordamerika-Muster (PNA,[48]) beobachtet werden, dessen Ausprägung im Januar am deutlichsten ist. Die veränderte Zirkulation des PNA-Musters bewirkt besonders warme Verhältnisse [14] sowie eine Niederschlagsabnahme im Nordwesten Nordamerikas. Damit verbunden ist eine Abkühlung sowie eine Niederschlagszunahme im Südwesten während des Winters.

Zum PNA Muster gehört zunächst ein mit der Intensivierung des Aleuten Tiefs verknüpfter Warmlufttransport entlang der amerikanischen Westküste nach Norden. Wegen der unterschiedlichen Intensität der Anomalien ist dieser Transport im November stärker ausgeprägt als im Dezember. Durch die negativen SLPA im Golf von Mexiko wird aus dem Bereich der karibischen Inseln Warmluft in den Südosten Nordamerikas geführt, die im Dezember zusammen mit dem warmen Luftmasen aus dem Pazifik die Kanadier ins Schwitzen bringt. Zum Ausgleich erhält der mittlere Westen und der Südwesten der USA kältere Luftmassen. Insgesamt sorgt dieses nordamerikanische Zirkulationsmuster für mehr Niederschläge im Süden der USA und im Golf von Mexiko. Dieses Niederschlagsmuster ist über den Winter hinweg sehr stabil und die eigentliche Ursache für die Erzeugung der Warmwasseranomalien im tropischen Atlantik, die aber erst etwa vier Monate später im März in Erscheinung treten.

Bei der Veränderung der Meridionalzirkulation auf der Nordhemisphäre durch El Niño wird die Nordatlantikoszillation (NAO) intensiviert. Die positiven SLPA im Bereich des Azorenhochs erzeugen dort höhere Temperaturen. Gleichzeitig werden polare Luftmassen in den westlichen Atlantik geführt und verursachen dort eine massive Kaltluftanomalie. In Abhängigkeit vom Vordringen der Kaltluftanomalie nach Europa hinein befinden sich die dahinterliegenden Ausgleichsströmungen über dem Kontinent etwas weiter östlich oder westlich.

Im November lassen sich die El Niño zugeordneten Niederschlagsanomalien in Europa recht gut mit den Luftmassenänderungen in Verbindung bringen. Im Dezember findet man allerdings kein klar ausgeprägtes Niederschlagsmuster. Lediglich im westlichen und im östlichen Mittelmeergebiet fällt weniger Niederschlag, was aus ganz unterschiedlichen Gründen geschieht: im Osten, weil kältere trockenere Luftmassen nach Süden transportiert werden, im Westen, weil sich der Hochdruckeinfluß verstärkt.

#### 4.1.2.3 Decay Phase

##### Januar und Februar

Da sich an der räumlichen Verteilung der SLPA im Pazifik und über Asien im Vergleich zum November und Dezember nichts wesentliches verändert, findet man hier auch ähnliche Temperatur- und Niederschlagsanomalien. Die Abschwächung des asiatischen Winterhochs ist allerdings nicht mehr so deutlich, so daß die Anomalien etwas schwächer werden. Eine Ausnahme sind die SSTA im tropischen Pazifik. Der Januar markiert den beginnenden Rückzug der im November und Dezember zu maximaler Stärke angewachsenen warmen Anomalien des Oberflächenwassers im tropischen Ostpazifik. Die dramatischsten Veränderungen beobachtet man allerdings im atlantischen Raum. Dabei hat das PNA Muster eine zentrale Bedeutung, dessen Ausprägung im Januar und Februar maximale Intensität erreicht.

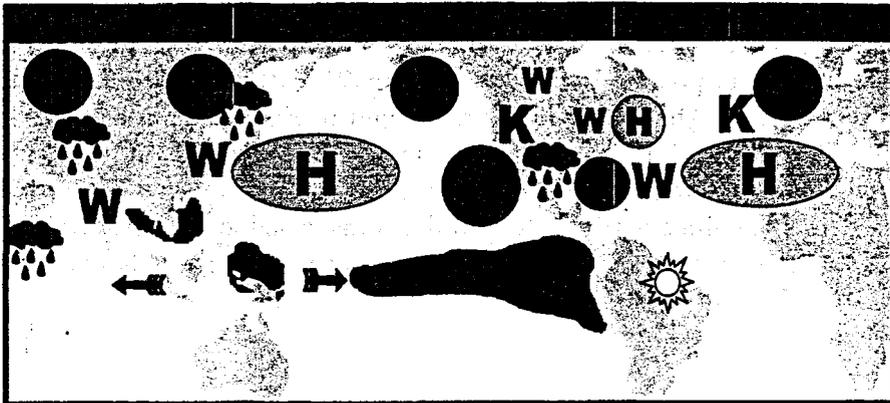
Bemerkenswert ist, daß sich der Schwerpunkt des PNA-Musters für den Januar im Pazifik, für den Februar dagegen im Atlantik, befindet. Aufgrund dieser Verschiebung ähneln die Februar-Anomalien im Atlantik und in Europa stark dem ebenfalls von Wallace und Gutzler definierten West-Atlantik-Muster (WA, [48]). Das WA-Muster umfaßt relativ niedrigen Luftdruck im Südatlantik und Europa sowie besonders hohen Luftdruck im Nordwesten des Atlantiks und über Nordamerika. Trotz der Verlagerung der Anomalien vom Januar zum Februar bleibt eine Gemeinsamkeit: In beiden Monaten wird die Nordatlantikoszillation (NAO) geschwächt. Im Januar reduziert sich der meridionale Luftdruckgradienten zwischen Nordafrika und Skandinavien, d.h. an der Ostflanke der NAO. Im Februar dagegen liegt die Abschwächung auf der Achse Grönland-Sargassosee und betrifft nur den westlichen Teil der NAO.

**Interpretation:** Die mittlere Zirkulation ist dem Jahresgang entsprechend in den Monaten Januar und Februar am intensivsten. Dadurch werden die Wechselwirkungen der Atmosphäre mit den angrenzenden Teilen des Klimasystems, hier der Orographie, verstärkt, was der deutlich sichtbare Effekt der Rocky Mountains in den Januar-Anomalien des Luftdrucks zeigt. Durch die Überströmung des Nord-Süd ausgerichteten Gebirges, die Wärmequelle im tropischen Ostpazifik und die Wechselwirkung mit der oberen Troposphäre und der Stratosphäre [38] wird ein Wellenmuster generiert, das die Zirkulationsstruktur im Atlantik und Europa bestimmt. Wahrscheinlich ermöglicht die daraus resultierende Schwächung des polaren Stratosphärenwirbels die Verlagerung des Schwerpunktes der negativen PNA Anomalie vom Pazifik in den Atlantik.

Aus den unterschiedlichen Anordnungen der einzelnen Druckgebilde im Januar und Februar ergeben sich natürlich auch Unterschiede in den Niederschlags und Temperaturmustern. Im Februar ist die negative Luftdruckanomalie über Europa im Vergleich zum Januar nach

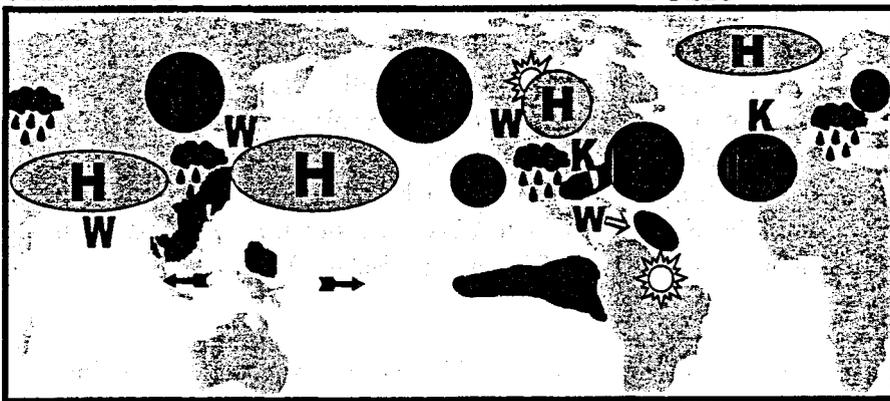
November / Dezember

NAO +



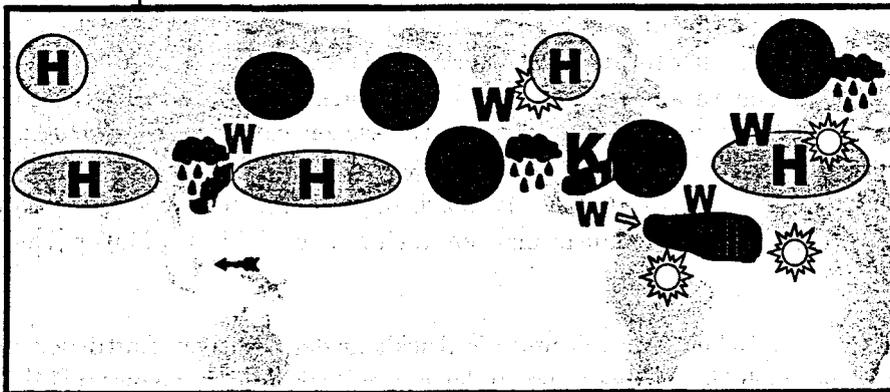
Januar / Februar

NAO -



März / April

NAO +



| Wasser | Niederschlag | Wind | Luftdruck | Lufttemperatur |
|--------|--------------|------|-----------|----------------|
| ■ warm | ☀ trocken    | →    | ● -       | W warm         |
| ■ kalt | ☁ feucht     |      | ● +       | K kalt         |

Abbildung 4.4: Fortsetzung der Abbildung 4.2.

Nordosten verschoben und über Nordafrika wird ein Luftdruckanstieg beobachtet, der eine Warmluftanomalie erzeugt. Zusätzlich wird durch die stark positive Anomalie im Luftdruck über Grönland der Transport polarer Luftmassen in den Westatlantik vermindert. Die im Januar von El Niño bewirkte Abkühlung im Atlantik und in Europa kann sich deshalb im Februar nicht ausbilden. Sowohl im Januar als auch im Februar zieht sich ein Band positiver Niederschlagsanomalien quer durch Europa, das von Gebieten mit weniger Niederschlag im Norden und im Süden eingerahmt wird. Aufgrund der unterschiedlichen Verhältnisse in der Zirkulation ist das Niederschlagsmuster im Februar weiter nach Norden verschoben und dehnt sich im Osten bis zum Ural hin aus.

### März und April

Im Vergleich zum Februar verlagert sich der Schwerpunkt der negativen Anomalien des PNA-Musters wieder zurück in den Pazifik und besetzt im April sogar den zentralen Nordpazifik. Die im Februar über Grönland beobachtete positive polare Luftdruckanomalie schiebt sich im März auf den nordamerikanischen Kontinent. Trotz all dieser Veränderungen bleibt die Struktur der dort beobachteten Temperatur- und Niederschlagsmuster weitgehend erhalten. Die Temperaturabnahme im Süden der USA erreicht im März ihren Höhepunkt und dehnt sich bis weit in den Atlantik hinein aus. Bereits im Februar bildet sich ein Band positiver Temperaturanomalien von der Karibik bis nach Afrika, das sich im März und April verstärkt. Grund dafür ist die Ausbildung positiver SSTA im tropischen Atlantik.

**Interpretation:** Mit der Ausbildung des PNA Musters im November wird im Süden der USA und im Golf von Mexiko mehr Niederschlag erzeugt. Dadurch bildet sich eine Kaltwasseranomalie, die vom Golf von Mexiko über Florida bis in die Sargassosee reicht und ab Januar signifikant in Erscheinung tritt. Sie erzeugt im Februar durch die „Blockierung“ der karibischen Strömung eine Warmwasseranomalie vor der Küste Venezuelas. Die Abschwächung des Nordostpassats im Bereich der Kanarischen Inseln durch das WA-Muster im Februar bzw. die Ostverlagerung des Azorenhochs im März und April ermöglichen zusammen mit der blockierenden Situation im Bereich des Karibikstroms den Aufbau der warmen SSTA im tropischen Atlantik. Die warmen SSTAs wiederum verstärken die NAO an ihrer Ostflanke, was das PNA Muster zum Rückzug in den Bereich des Pazifik veranlasst. Beobachtungen über ein verzögertes Eintreten des EL-Niño-Phänomens im Atlantik machen auch z.B. Enfield und Mayer [7].

Die warmen SSTA im tropischen Atlantik und die Rückkehr der positiven Luftdruckanomalie in den Ostatlantik und nach Nordafrika führt zu der von Halpert und Ropelewski [14] angegebenen Erwärmung im Südwesten Europas im Frühjahr. Sie ist mit einer Warmluftadvektion aus dem Westatlantik und dem tropischen Atlantik verknüpft. Entsprechend zeigt das Niederschlagsmuster über Europa eine klare Trennlinie zwischen weniger Niederschlag im Süden (hier überwiegt der Hochdruckeinfluß) und mehr Niederschlag im Norden (warme und feuchte Luftmassen aus Südwesten). Die Trennlinie ist durch die Alpen gegeben. Schließlich bleibt noch zu bemerken, dass es an der Ostküste Asiens auch im März und April außergewöhnlich warm ist.

## Mai und Juni

Die Temperaturverteilung im Atlantik bleibt bis in den Juni hinein erhalten, schwächt sich aber deutlich ab. Auffällig ist die Entstehung positiver Temperaturanomalien über Indien im Juni, die mit keinem markanten Luftdruck oder Niederschlagsmuster in Verbindung stehen. Insgesamt zeigt der Sommer jedoch eine allgemeine Abschwächung der mit El Niño verknüpften nordhemisphärischen Anomalien.

### 4.1.3 Einfluß von El Niño auf die NAO

Ein für das europäische Klima bestimmender Faktor ist die Nordatlantikoszillation, die im Abschnitt 4.2 beschrieben wird. Deshalb ist die Frage nach einer Veränderung der NAO durch El Niño ein besonders wichtiger Aspekt einer europäischen Klimavorhersage. Die vorangegangenen Abschnitte zeigen, dass der Zusammenhang über den Winter hinweg starken Variationen unterliegt. Im November und Dezember wird die NAO verstärkt, im Januar und Februar geschwächt und im März und April aufgrund der positiven SSTA im Atlantik wieder verstärkt. Zudem sind die Änderungsmuster der NAO räumlich sehr variabel. Diese vielfältigen Formen der Veränderung können natürlich durch einen einfachen NAO-Index, der aus der Differenz des an zwei ortsfesten Stationen gemessenen Luftdrucks besteht, nicht in vollem Umfang erfasst werden. Deshalb können keine signifikanten Korrelationen zwischen einer solchen Indexreihe und beispielsweise dem Southern Oscillation Index (SOI), der das ENSO-Phänomen charakterisiert, gefunden werden. Hier ist in jedem Fall eine räumlich differenzierte monatlich aufgelöste Betrachtungsweise erforderlich. Die Abbildung 4.5 faßt den prinzipiellen Ablauf eines EL-Niño-Phänomens zusammen, wobei die Auswirkungen auf die NAO besonders markiert sind.

Die Zirkulationsmuster im Atlantik zeigen besonders starke Veränderungen, wenn man die Monate November und Dezember mit den Monaten Januar und Februar vergleicht. Kennzeichnend für November und Dezember ist die intensivierte polare Zirkulation mit einheitlich negativen SLPA rund um den Nordpol. Im Januar und Februar dagegen erkennt man eine Schwächung des Island-Tiefs verbunden mit einer Reduzierung des meridionalen Luftdruckgradienten im Bereich des subtropischen Atlantik bzw. über Afrika. Dies bedeutet, daß im November und Dezember die NAO verstärkt wird, während sie im Januar und Februar an Intensität verliert. Diese Veränderung der bodennahen Anomalienmuster im Verlauf des Winters könnte in Zusammenhang mit der stratosphärischen Zirkulation stehen.

Beobachtungen [43] und Modellsimulationen mit den Klimabedingungen des Januar [26, 40] haben gezeigt, daß eine Schwächung des polaren Vortex durch die während El Niño verstärkten Westwindanomalien des Subtropenjets hervorgerufen werden kann. Perlwitz und Graf [33] finden mit Hilfe einer Canonical Correlation Analysis (CCA) der Wintermittel (DJF) des 50hPa und des 500hPa Geopotentialfeldes zwei verschiedene Muster für den Zusammenhang zwischen der Stratosphäre und der Troposphäre. Das erste Muster verknüpft eine Intensivierung des polaren stratosphärischen Wirbels mit einem 500hPa Anomalienmuster, das den in dieser Arbeit gefundenen Druckanomalien im November und Dezember ähnelt. Das zweite Muster, das eine Schwächung des Polarwirbels über Nordamerika und eine Verstärkung der stratosphärischen Westwinde über Eurasien während El Niño zeigt, ist im 500hPa Niveau durch ein PNA ähnliches Muster charakterisiert und ist mit den hier gefundenen Anomalien im Februar vergleichbar. Legt man die Ergebnisse der PCPA zugrunde, könnte der polare Wintervortex während El Niño im November und Dezember eine Verstärkung erfahren,

Sommer 0

### Schwache nordhemisphärische Zirkulation

Luftdruck ist in polaren Breiten erhöht  
Abschwächung von: i) der mittleren Druckgebilde der Nordhemisphäre  
ii) Walker Zirkulation und SW-Monsun

Pazifik SSTA

September  
Oktober

### vorzeitiger Rückzug der ITCZ im Bereich Asien/Westpazifik

erhöhter SLP von der Arabischen Halbinsel bis China  
vorzeitiges Ende des SW-Monsuns  
weitere Schwächung der Walker Zirkulation  
(Ostwindanomalien im Ind. Ozean + Westwindanomalien im trop. Pazifik)

November  
Dezember

### Intensivierung der nordhemisphärischen Zirkulation

(Luftdruck: erhöht in den Subtropen – verringert in polaren Breiten)

Abschwächung der kontinentalen asiatischen Hochdruckzelle  
Ausweitung der positiven SLPA von Asien bis in den zentralen Pazifik  
Intensivierung des Aleutentiefs und Verstärkung der NAO  
Entstehung des PNA-Musters mit mehr Niederschlag von Kalifornien bis Florida

Januar

### Verstärkung des PNA Musters

Golf v. Mexiko und Sargassosee:  
Luftdruckreduktion → mehr Niederschlag → Kaltwasseranomalie  
Abschwächung der NAO

Februar

### Ausbildung des WA-Musters

(Verstärkung des Atlantischen Teils des PNA-Musters)

Verstärkung der Kaltwasseranomalie im Golf v. Mexiko und der Sargassosee  
Ausbildung einer Warmwasseranomalie in der Karibik  
Abschwächung der NAO

März  
April

### Warmwasseranomalie von der Karibik bis nach Westafrika

Erhöhung des Luftdrucks im Subtrop. Ostatlantik und über Nordafrika  
Verstärkung der NAO  
Rückzug der PNA Anomalie in den Pazifik

Sommer +1

### Ende der beobachteten Anomalien

Abbildung 4.5: Zusammenfassung des prinzipiellen Ablaufs eines EL-Niño-Phänomens und dessen Auswirkung auf den Atlantik und die NAO beginnend im Sommer des Jahres (0) mit dem Maximum der SSTA im tropischen Pazifik bis zum Sommer danach (+1).

während im Januar und Februar auch Abschwächungen möglich wären.

Die Signalmuster des Abschnitts 4.1.5 lassen eine noch weitergehende Interpretation dieses Vorgangs zu. Die Veränderungen in der Dynamik der atlantischen Zirkulation zum Jahreswechsel beruht auf der im Hochwinter immer intensiver werdenden Zirkulation und der damit verbundene Erzeugung planetarer Wellen. Bei der Erzeugung dieser Wellen spielt die Orographie eine entscheidende Rolle. Das SLPA Muster des Januar zeigt deutlich den Effekt der Rocky Mountains auf die Strukturierung des PNA Musters. Im Vergleich zum November und Dezember verändert der orographische Einfluß natürlich die Anomaliestruktur im Atlantik und in Europa. Wie es die Beobachtungen und Modellsimulationen nahelegen, beeinflusst dieser Vorgang auch die Stratosphäre bzw. wird durch diese Wechselbeziehung überhaupt erst möglich. Die warmen SSTA im tropischen Pazifik intensivieren den Subtropenjet [40], der den polaren stratosphärischen Wirbel schwächt und die positiven SLPA in den polaren Breiten verursacht. Insgesamt entsteht dadurch eine Abschwächung der NAO.

Auffällig ist, dass die positive polare Anomalie mit ihrem Schwerpunkt von Skandinavien über Grönland während des Winters bis nach Nordamerika wandert, wo sie im März ankommt. Dazu assoziiert ist die Verlagerung des Schwerpunkts der Luftdruckabnahme im PNA Muster vom Pazifik im Januar in den Atlantik im Februar und wieder zurück in den Pazifik im März und April. Vermutlich hängt dieses Phänomen mit dem Rückgang der SSTA im tropischen Pazifik und dem Aufbau des atlantischen El-Niño-Phänomens zusammen. Um dieses Phänomen aber im Detail zu klären, müssen die Analysen auf die höhere Atmosphäre, insbesondere auch auf die Stratosphäre, erweitert werden.

Im März befindet sich die positive polare Luftdruckanomalie über Nordamerika und verliert damit den schwächenden Einfluß auf das Islandtief. Zudem setzt sich über Nordafrika und dem Ostatlantik wieder ein Luftdruckanstieg durch, der zusammen mit der negativen Anomalie über Nordeuropa den meridionalen Luftdruckgradienten dort verstärkt, was die NAO intensiviert und eine Warmluftanomalie über Südeuropa erzeugt.

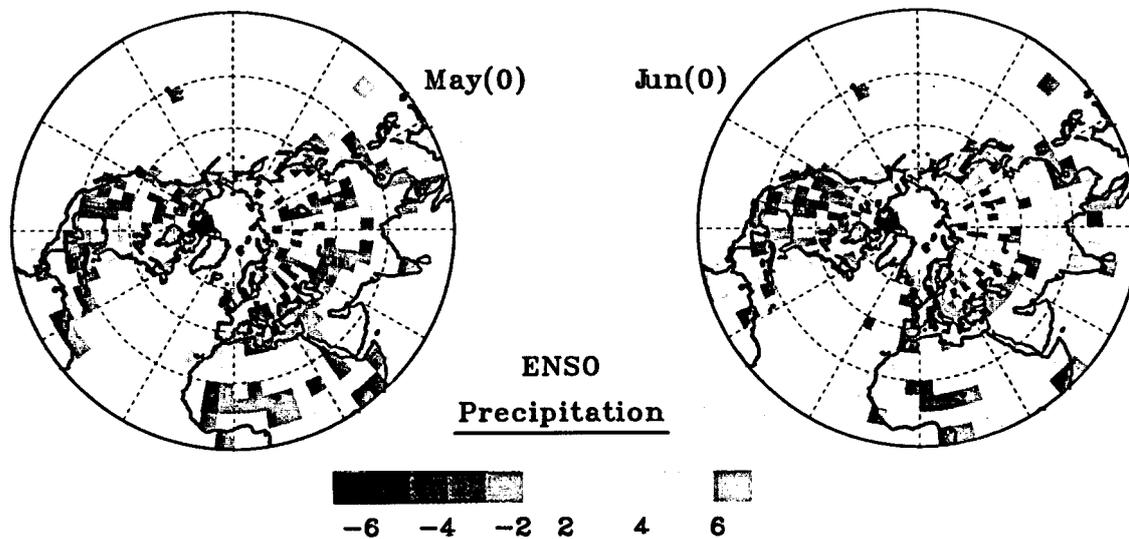
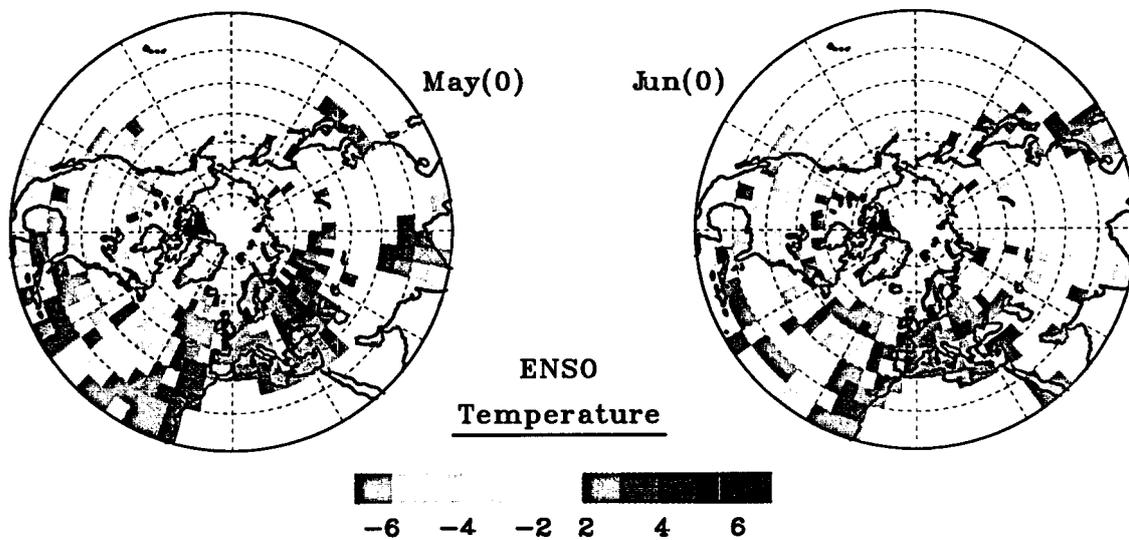
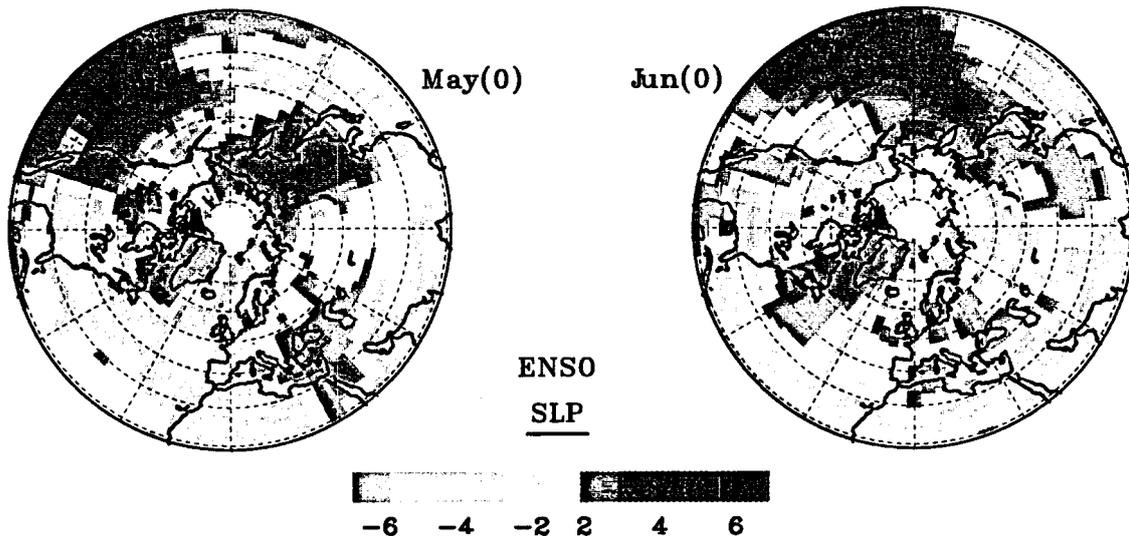
#### 4.1.4 Wertung

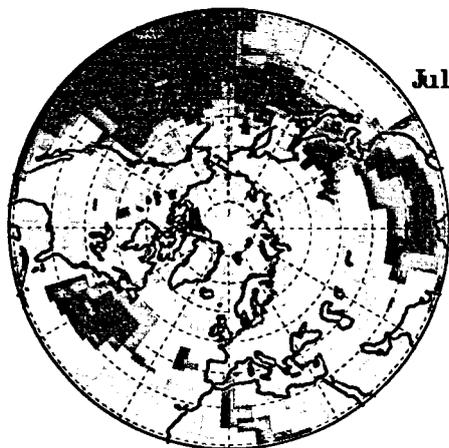
Die Anwendung der PCPA auf die bodennahen Klimadaten hat eine Vielzahl von bisher unbekanntem mit dem ENSO-Phänomen in Zusammenhang stehenden Anomalien zu Tage gefördert. Insbesondere die von Monat zu Monat sehr unterschiedlichen Anomalien in Europa konnten im Detail beschrieben werden. Darüber hinaus konnte ein Ablaufdiagramm eines typischen El-Niño-Phänomens erstellt werden, das nicht nur die tropischen, sondern auch die außertropischen Anomalien miteinander verknüpft. Hier wurden die entscheidenden Voraussetzungen zur Realisierung von Vorhersagen der mit El Niño verknüpften Anomalien geschaffen. Beispielsweise erlaubt ein genaues Monitoring der Niederschlagsverhältnisse im Süden der USA sowie der SSTA im Golf von Mexiko und der Sargassosee am Ende eines Jahres eine Abschätzung über den Ablauf des atlantischen El Niño, dessen Auswirkungen erst Monate später im darauffolgenden Jahr in Europa zu spüren sind.

#### 4.1.5 Signalmuster

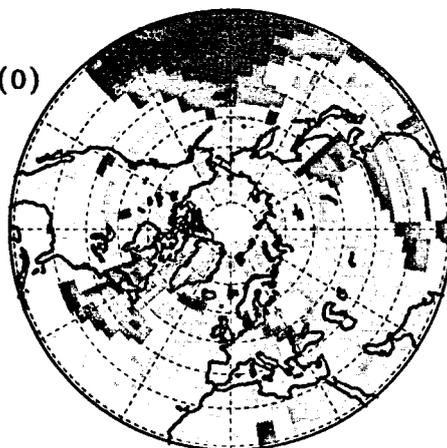
Dargestellt sind die Principal Correlation Pattern (PCP) des SOI-EN3.4 Index (siehe Abschnitt 3.2.1) im bodennahen Luftdruckfeld (SLP), in der Temperatur und im Niederschlag (Precipitation). Angegeben ist der Kendallsche Korrelationskoeffizient in Einheiten der Standardabweichung ( $2 \simeq 90\%$ ,  $3 \simeq 99.7\%$ ) zwischen dem SOI-EN3.4 und den gefilterten Zeitreihen des jeweiligen Klimaelementes. Die Farbgebung ist so gewählt, dass im Fall eines El-Niño-Phänomens die pinken (roten, gelben) Schattierungen einen Luftdruckanstieg (Temperaturanstieg, Trockenheit) anzeigen. Die Zeitpunkte der einzelnen Karten sind durch den Monatsnamen mit in Klammern angefügter Zahl (0 oder +1) gegeben. Dabei definiert eine 0 das Jahr mit den maximalen Meeresoberflächentemperaturen im tropischen Ostpazifik, die in der Regel zwischen Oktober und Dezember auftreten, und eine +1 bezeichnet das Jahr danach.

Bei der Interpretation der Signalmuster ist zu beachten, daß in den Abbildungen die Korrelationen der Klimagrößen zum SOI dargestellt sind, der zu den Meeresoberflächentemperaturen antikorreliert ist, d.h. ein positiver Wert des Kendallschen Koeffizienten bedeutet eine negative Anomalie während El Niño. Eine mögliche Asymetrie zwischen El-Niño- und La-Niña-Anomalien ist in den hier dargestellten räumlichen Korrelationsmustern nicht sichtbar, da die PCPA das Differenzsignal der beiden Extreme erfaßt.



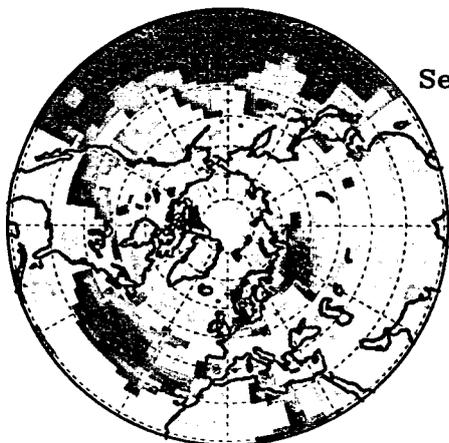


Jul(0)

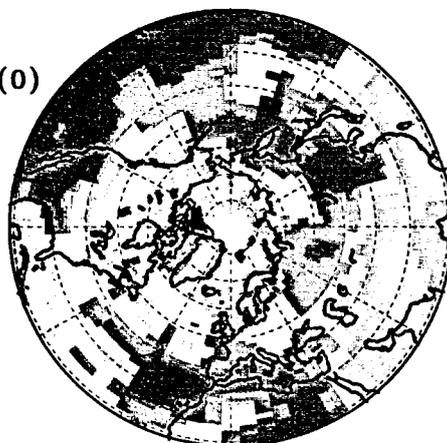


Aug(0)

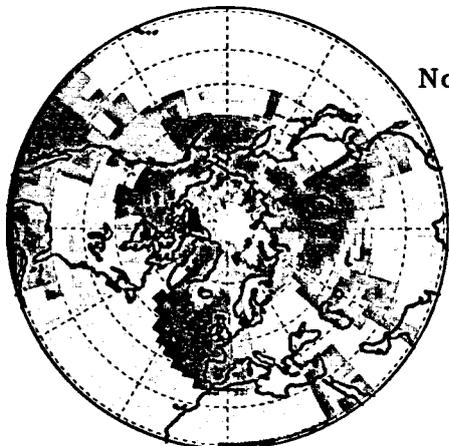
ENSO  
SLP



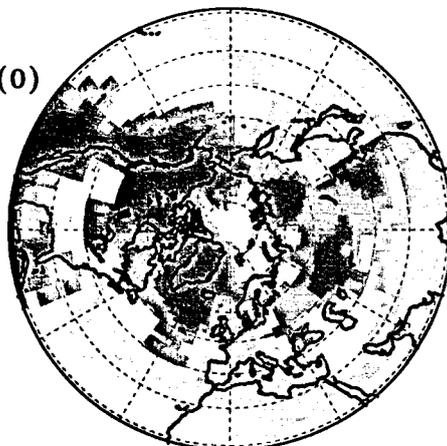
Sep(0)



Oct(0)

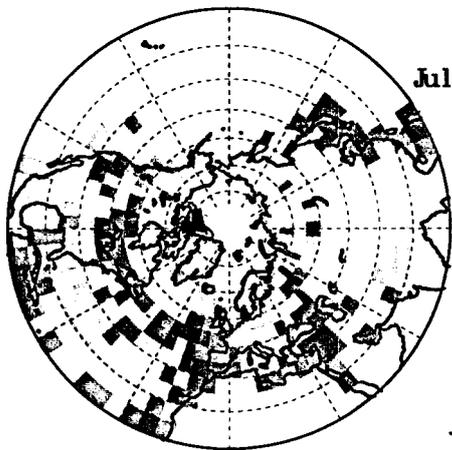


Nov(0)

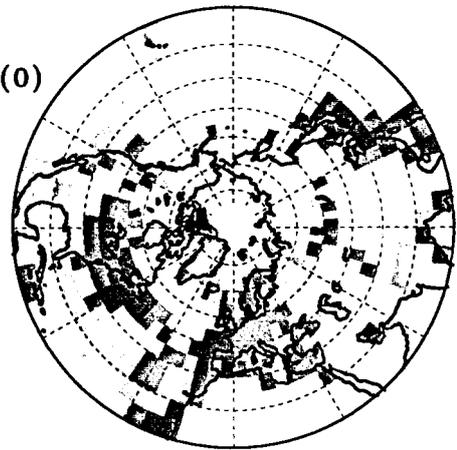


Dec(0)



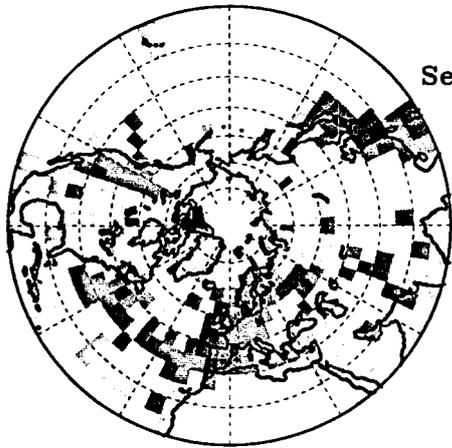


Jul(0)

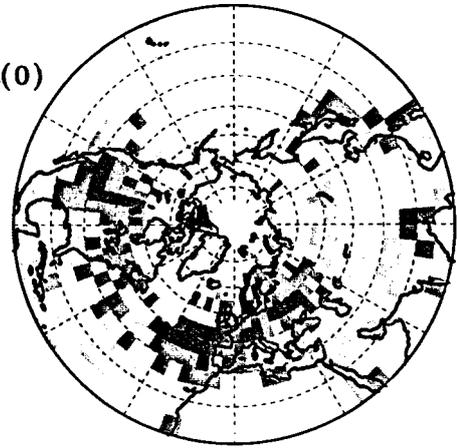


Aug(0)

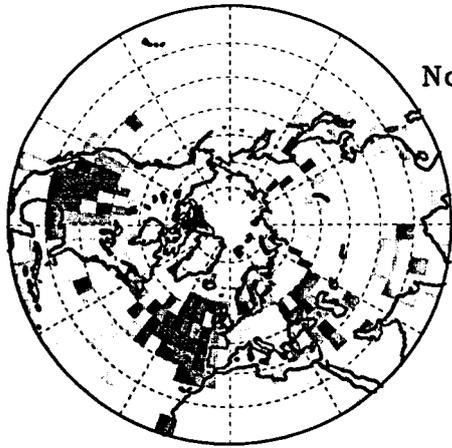
ENSO  
Temperature



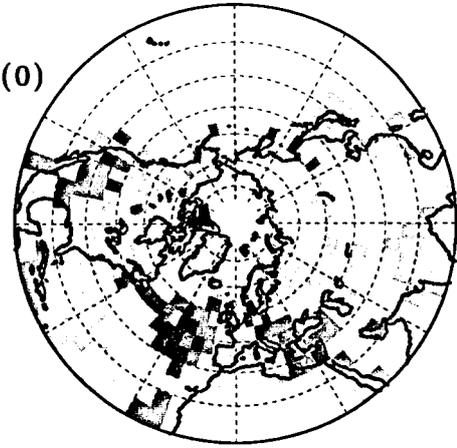
Sep(0)



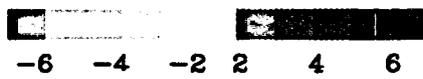
Oct(0)

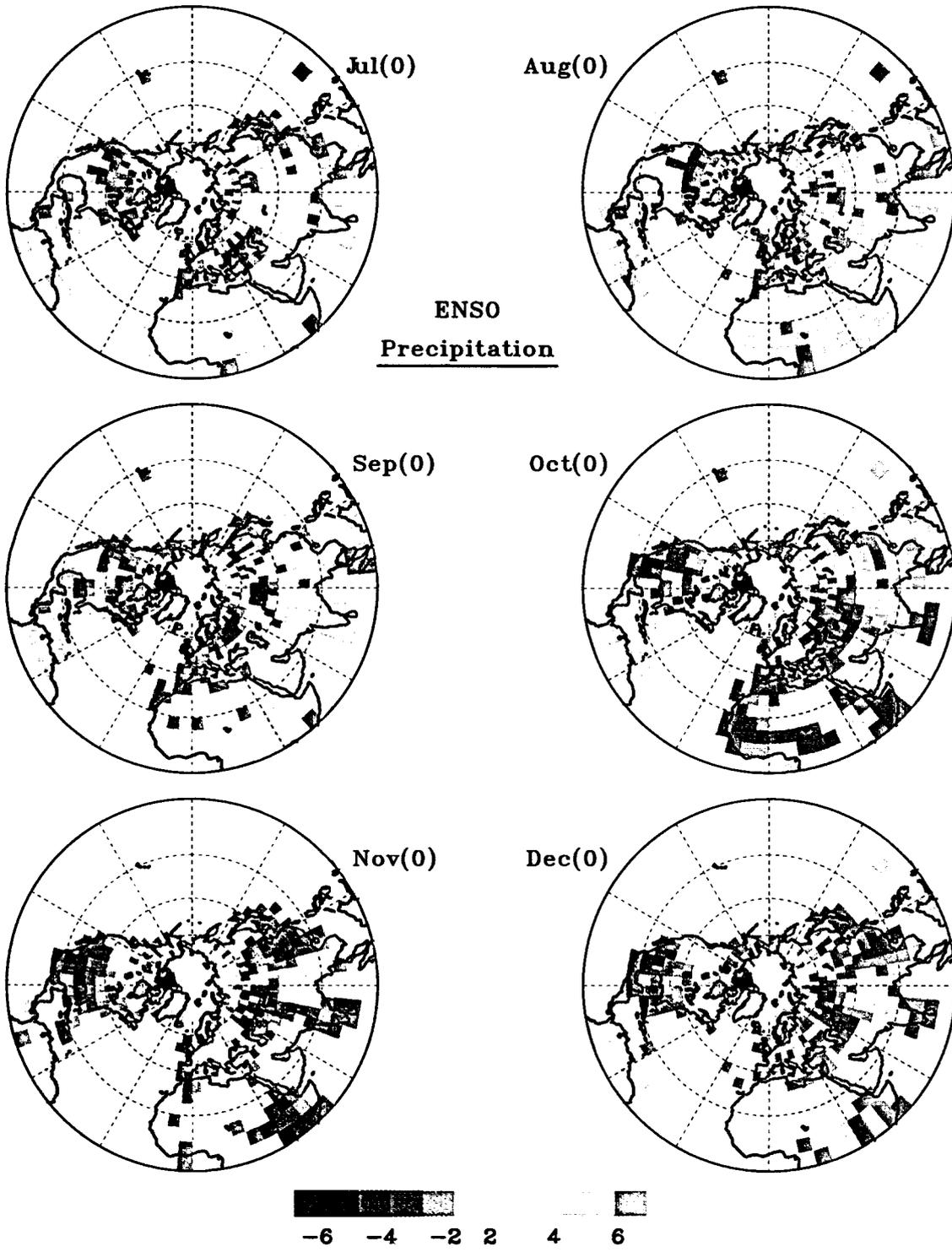


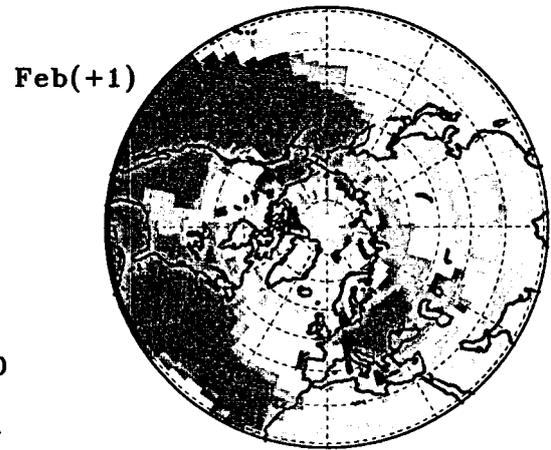
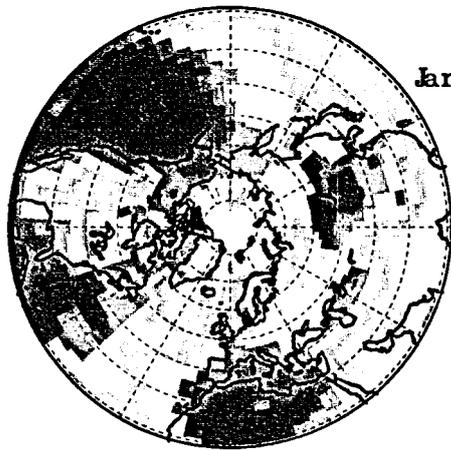
Nov(0)



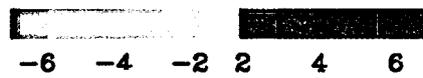
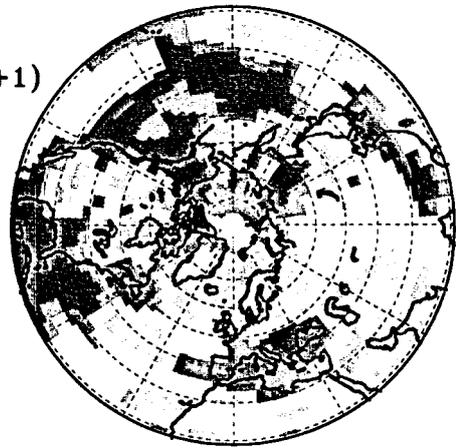
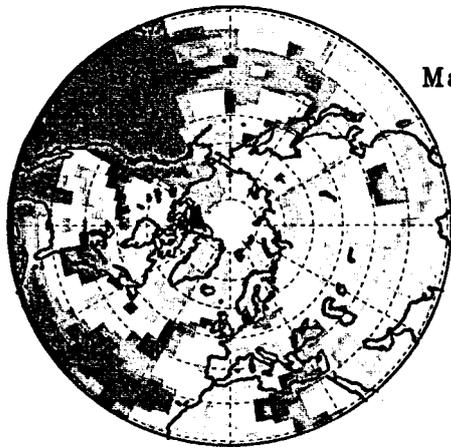
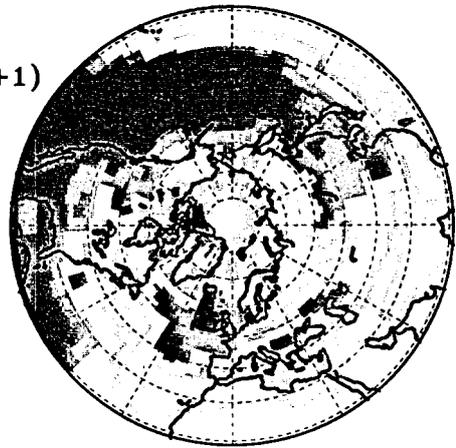
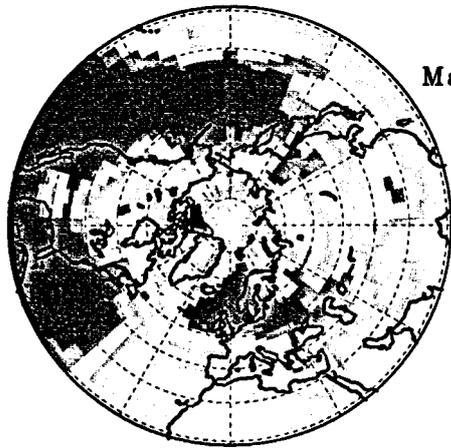
Dec(0)

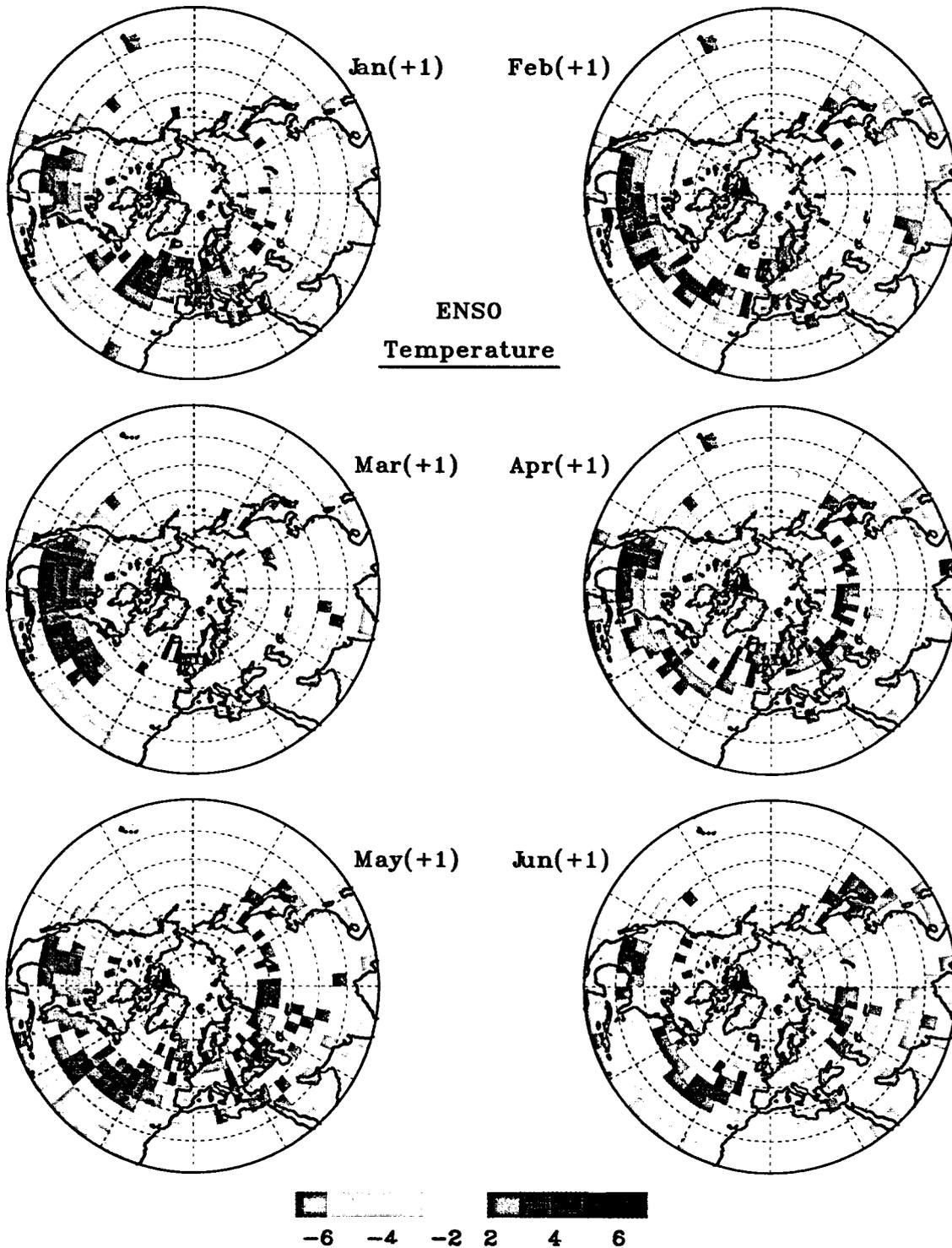


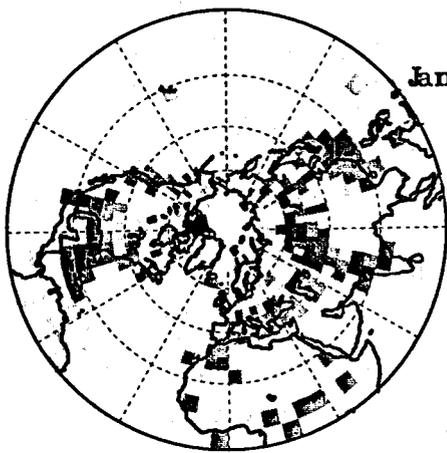




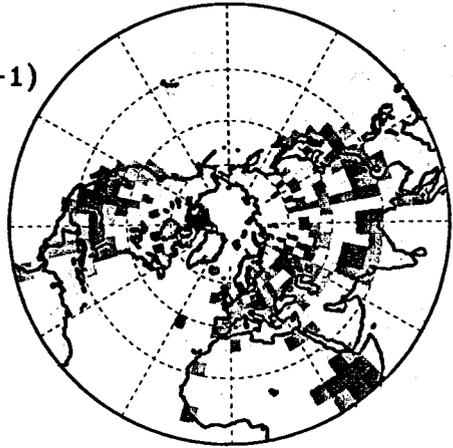
ENSO  
SLP





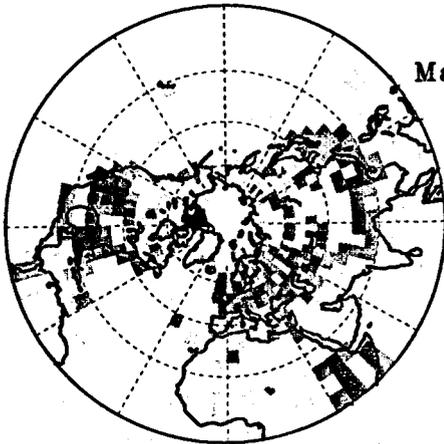


Jan(+1)

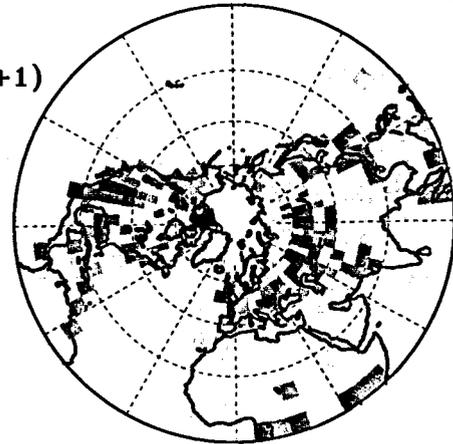


Feb(+1)

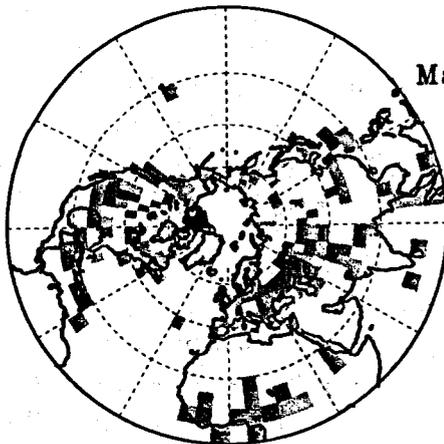
ENSO  
Precipitation



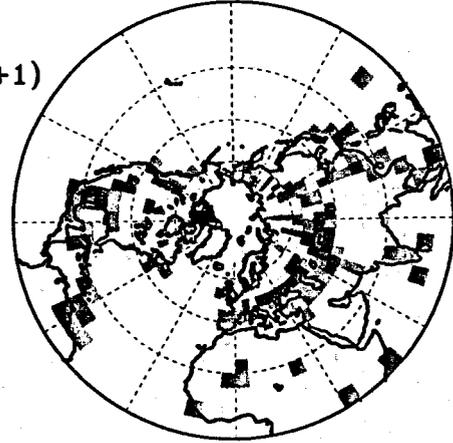
Mar(+1)



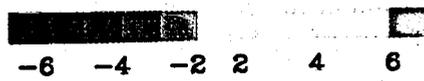
Apr(+1)



May(+1)



Jun(+1)



## 4.2 Nordatlantikoszillation

Ein für das europäische Klima bestimmender Faktor ist die Nordatlantikoszillation (NAO; z.B. [23]). Je nach Stärke und Lage von Islandtief und Azorenhoch verändern sich die Zirkulation und ggf. die Zyklonenzugbahnen über Europa, was zu Temperatur- und Niederschlagsanomalien in den betroffenen Gebieten führt. Dieser Mechanismus ist im Winter wegen der in dieser Jahreszeit besonders intensiven Zirkulation besonders ausgeprägt. Entsprechend kann ein erheblicher Teil der in Europa beobachteten Klimavariabilität durch eine einzige Indexgröße beschrieben werden, die Lage und Intensität von Azorenhoch und Islandtief mißt. Hier wird dazu die Luftdruckdifferenz zwischen der Station Stykkisholmur auf Island und der Station Gibraltar [24] verwendet, die im Bereich der genannten Druckgebilde liegen. Der Abschnitt 3.2.2 beschreibt weitere in der Literatur verwendete Indexzeitreihen. Das Signal der NAO in den Klimadaten unterliegt vor allem in den Wintermonaten kaum monatlichen Schwankungen, so daß hier nur jahreszeitliche Mittelwerte behandelt werden. Die PCP's der NAO im Abschnitt 4.2.3 bestätigen im wesentlichen das bekannte Muster der Wirkungen der NAO im atlantischen Raum.

### 4.2.1 Diskussion

**Luftdruck** In der positiven Phase der NAO findet man während des ganzen Jahres eine Absenkung des Luftdrucks über Island und eine Luftdruckerhöhung im Bereich des Azorenhochs. Dabei sind die Anomalien im Winter am ausgeprägtesten. Im Gegensatz zu den bisher bekannten Studien (z.B. [21]) sind der NAO in der gesamten Nordhemisphäre Signale zuzuordnen. Im Winter zeigt sich ein sehr symmetrisches Muster mit Luftdrucksteigerungen im Bereich von 20° bis 50° Nord (Ausnahme ist der östliche Teil des asiatischen Kontinents) und Luftdruckreduzierungen im Bereich polarer Breiten. Wie die Abbildung 4.6 zeigt, hat das PCP der NAO im Luftdruckfeld große Ähnlichkeit mit der ersten EOF dieses Feldes, obwohl die NAO eine lokale Indexgröße ist. Die erste EOF des bodennahen Luftdruckfeldes definiert das Muster der arktischen Oszillation (AO [37]), die eine verstärkte (abgeschwächte) Zirkulation im Atlantik mit einer abgeschwächten (verstärkten) Zirkulation im Pazifik bei positiver (negativer) Phase der NAO verknüpft. Die Anregung dieses Anomaliemusters wird auch im Zusammenhang mit dem ENSO-Phänomen im Januar und Februar beobachtet. Das besondere an diesem Muster ist, daß es bis in die Stratosphäre hinein nahezu unverändert bleibt und die Stärke des polaren stratosphärischen Wirbels beschreibt. Die PCPA zeigt, daß NAO, AO und die Stärke des polaren stratosphärischen Wirbels eng miteinander verknüpft sind.

**Temperatur** Zu dem Zirkulationsmuster der NAO gehört ein charakteristisches Temperatursignal mit zwei Gebieten wärmerer Verhältnisse während der positiven Phase der NAO. Die Temperaturen sind höher als normal in einem Bereich, der sich quer über Mittel- und Nordeuropa bis nach Rußland erstreckt und in einem Gebiet, das vom Nordosten Amerikas in den Atlantik hinein reicht. Darum gruppieren sich Kaltluftgebiete im nördlichen Atlantik und über Grönland sowie im subtropischen Atlantik und im Mittelmeerraum. Die Temperaturanomalien über und um den Atlantik herum lassen sich wie folgt erklären: Das verstärkte Azorenhoch in der positiven Phase der NAO bedingt kräftigere Passatwinde, die warmes Oberflächenwasser von der nordafrikanischen Küste weg in den Westatlantik treiben und damit kälteres Wasser an die Oberfläche holen, so daß zwischen 20 und 30 Grad Nord mit

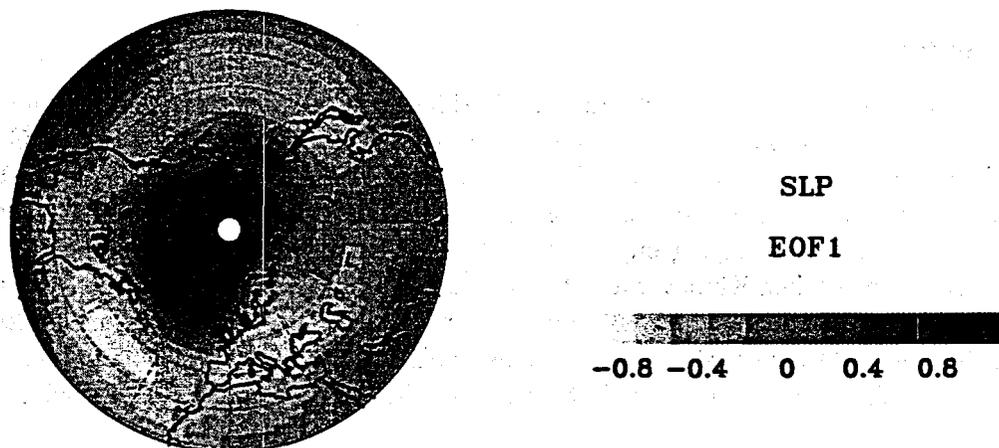


Abbildung 4.6: Erste EOF des bodennahen Luftdruckfeldes in standardisierten Einheiten. Grundlage der Analyse ist ein  $10^\circ \times 5^\circ$  Gitter mit Daten von 1873 bis 1995.

dem Schwerpunkt vor der afrikanischen Küste relativ tiefe Temperaturen gemessen werden. Die an der Westflanke des Azorenhochs nach Norden gerichtete Strömung und die durch das Islandtief verstärkten Westwinde vermehren den Warmwassertransport aus der Karibik nach Europa durch den Golfstrom und verursachen die ausgedehnten Warmluftanomalien über Nordamerika und Europa. Getrennt werden die beiden Warmluftanomalien durch die polaren Luftmassen, die das intensivierete Islandtief in den Nordatlantik leitet. Der Mittelmeerraum erhält durch die Intensivierung des Azorenhochs eine zusätzliche Nordkomponente in der Strömung, so daß es dort bei positiver NAO kühler wird. Neben den Anomalien im Atlantik findet man Antikorrelationen der Temperatur zur NAO auf dem indischen Subkontinent und an der Ostküste Asiens. Besonders interessant sind die Temperaturanomalien an der Pazifikküste Asiens, da hier im Winter zudem ausgeprägte Niederschlagsanomalien auftreten. Beide Phänomene sind auf die Schwächung des Aleutentiefs zurückzuführen, daß im Rahmen der AO mit der NAO gekoppelt ist und in diesem Bereich den Anteil der Wetterlagen mit Advektion polarer Luftmassen vermindert.

**Niederschlag** Über dem nordamerikanischen Kontinent beobachtet man eine Zweiteilung der Niederschlagsanomalien: mehr Niederschlag im Süden und in der Mitte, weniger Niederschlag im Norden für positive Werte der NAO. Ursache für den fehlenden Niederschlag im Norden ist die Schwächung des Aleutentiefs, so daß weniger maritime Luft vom Pazifik in die hohen nördlichen Breiten des amerikanischen Kontinents geführt wird. Auf der anderen Seite erhält der Kontinent von Südwesten verstärkt feuchte tropische Luftmassen aufgrund der positiven Luftdruckanomalien im Atlantik, die zusätzliche Wärme und Niederschläge bringen. In Europa findet sich ebenfalls ein Nord-Süd Unterschied im Niederschlag. In Nordeuropa fällt wegen der dort stattfindenden Zyklonalisierung mehr Niederschlag. Dagegen wird in Süd- und Mitteleuropa im Bereich des Luftdruckanstiegs weniger Niederschlag beobachtet. Besonders auffällig ist das lange Band von Gitterboxen mit Niederschlagszunahme entlang der afrikanischen Mittelmeerküste. Offensichtlich läßt die zusätzliche Nordkomponente der Strömung den Wind häufiger vom Mittelmeer auf die afrikanische Küste wehen, was dort zu

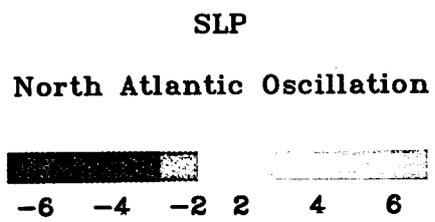
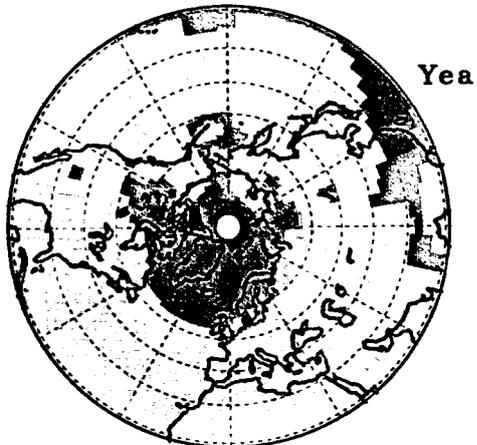
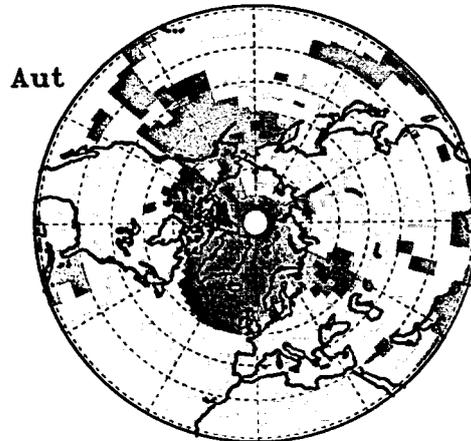
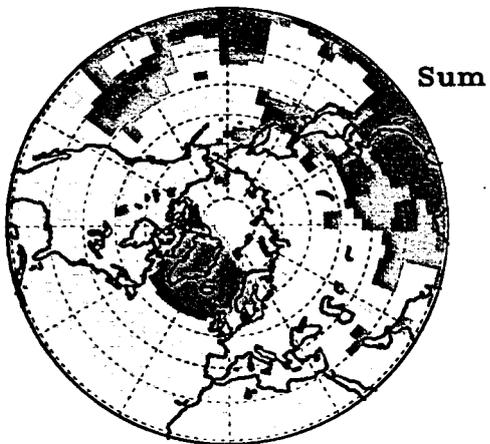
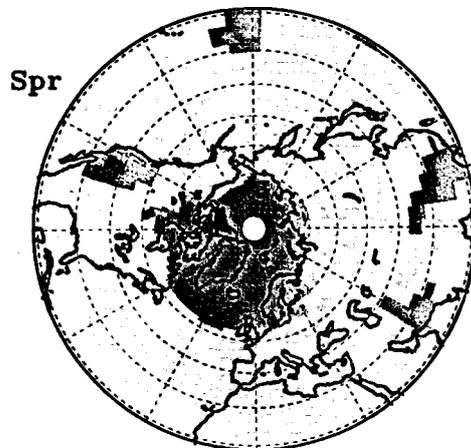
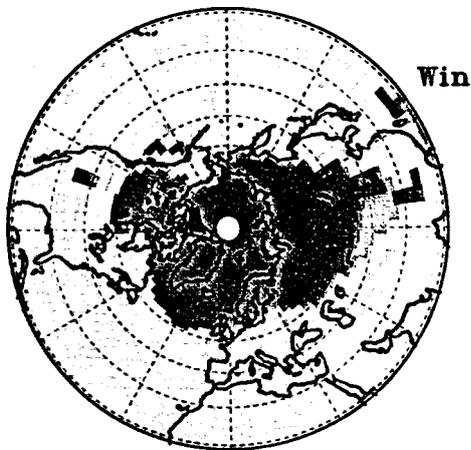
mehr Niederschlägen führen sollte.

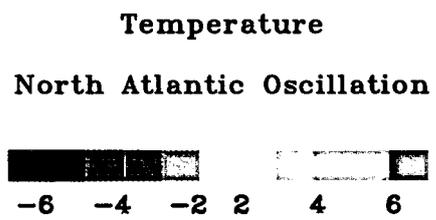
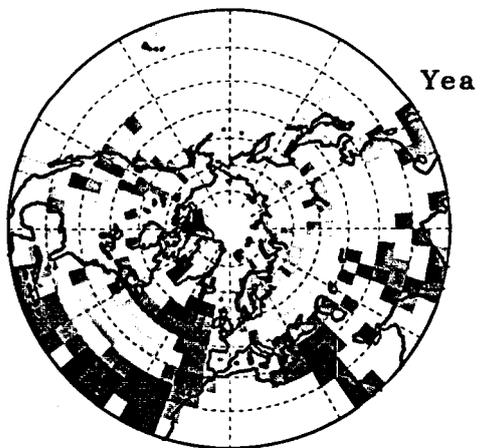
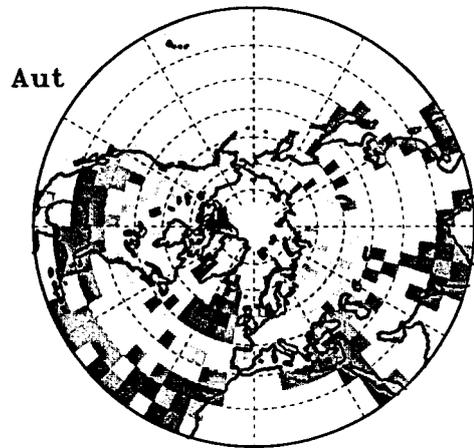
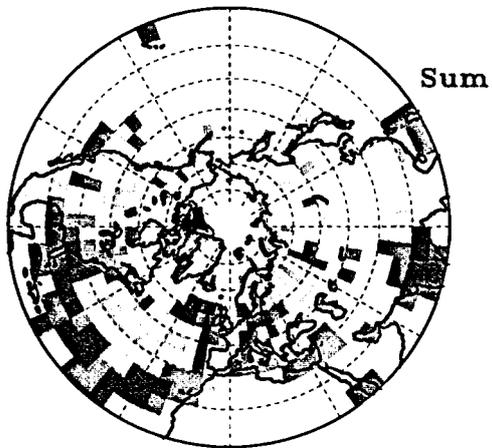
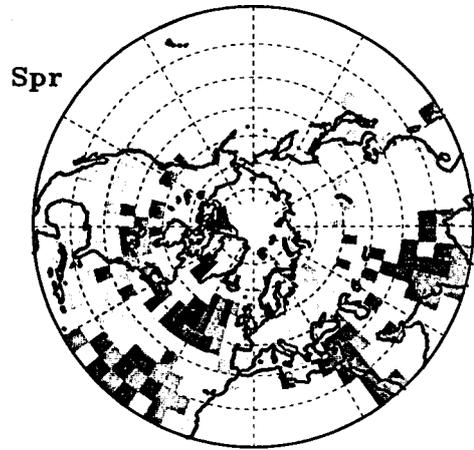
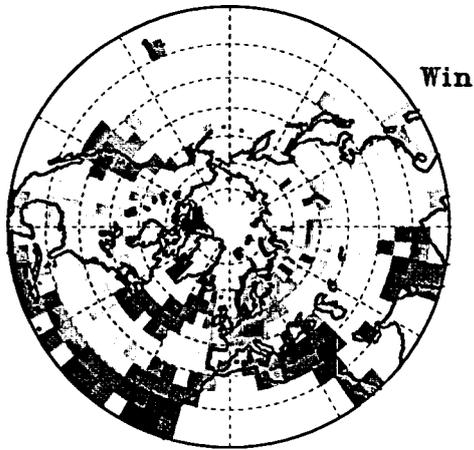
#### 4.2.2 Wertung

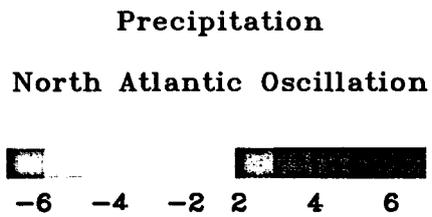
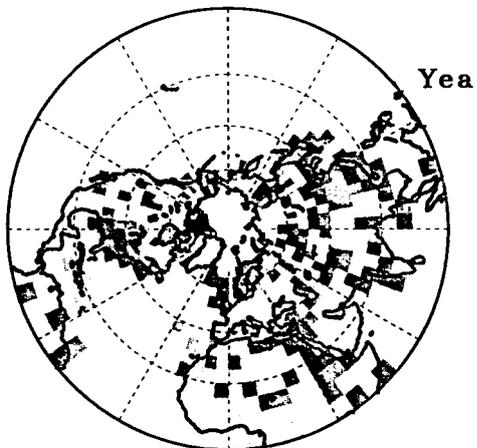
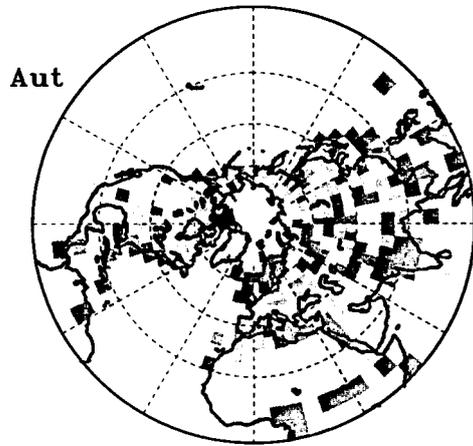
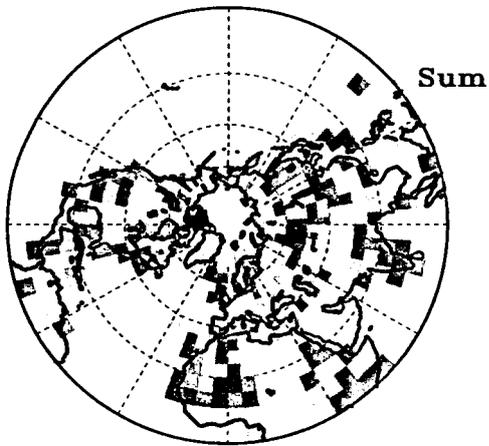
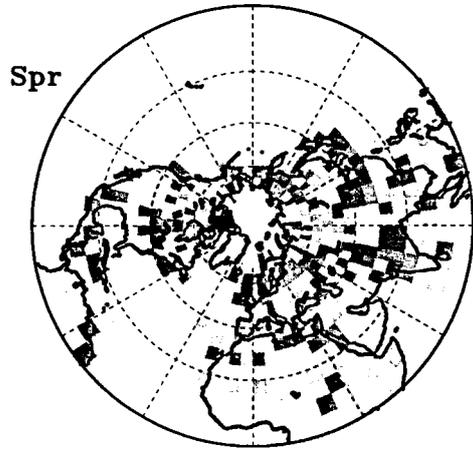
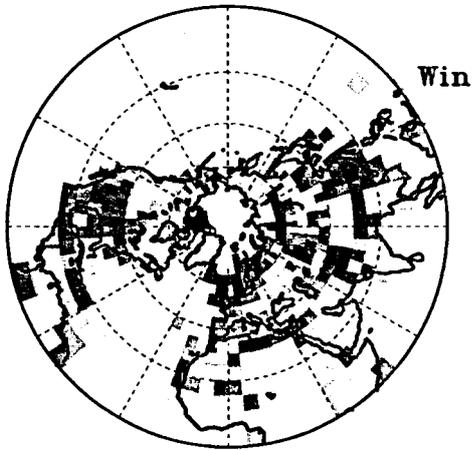
Als Besonderheit belegt die PCPA eindeutig die Verbindung zwischen der NAO und der AO und somit auch die Verbindung der NAO zur stratosphärischen Zirkulation. Die AO beschreibt ein gegenläufiges Verhalten der Winterzirkulation im Atlantik und Pazifik. Diese Gegenläufigkeit wird auch im Zusammenhang mit anderen Klimaantrieben (ENSO) beobachtet, so daß hier von der Anregung eines natürlichen Modes gesprochen werden kann. Die Vorhersage der europäischen Klimavariabilität ist besonders durch die Extrema der NAO geprägt, da die NAO von allen Antrieben die meiste Varianz des europäischen Klimas erklärt. Allerdings ist die NAO eine Größe mit einem besonders breitbandigem Frequenzspektrum nahe dem von weißem Rauschen. Eine Vorhersage der NAO ist deshalb extrem schwierig.

### 4.2.3 Signalmuster

Dargestellt sind die Principal Correlation Pattern (PCP) des NAO-Index (siehe Abschnitt 3.2.2) im bodennahen Luftdruckfeld (SLP), in der Temperatur und im Niederschlag (Precipitation). Angegeben ist der Kendallsche Korrelationskoeffizient in Einheiten der Standardabweichung ( $2 \simeq 90\%$ ,  $3 \simeq 99.7\%$ ) zwischen dem SOI-EN3.4 und den gefilterten Zeitreihen des jeweiligen Klimaelementes. Die Farbgebung ist so gewählt, dass im Fall eines positiven NAO Wertes die pinken (roten, gelben) Schattierungen einen Luftdruckanstieg (Temperaturanstieg, Trockenheit) anzeigen.







## 4.3 Sonne

Die Hypothese eines Zusammenhangs zwischen dem quasi-11-jährigen solaren Zyklus und der atmosphärischen Dynamik wurde bereits von Labitzke und van Loon ([27, 28, 44, 29]) aufgestellt. Einfache Korrelationsrechnungen zwischen den Schwankungen der solaren Einstrahlung und den Klimaelementen Temperatur und Luftdruck haben gezeigt, dass im Klimasystem eine dekadische Oszillation existiert, die in Phase mit solaren Variationen ist. Allerdings sind die Schwankungen der solaren Strahlung von etwa  $1W/m^2$  bei einem mittleren Wert von  $1370W/m^2$  so gering, dass erhebliche Zweifel an einem solchen Zusammenhang bestehen. Zudem konnte gezeigt werden, dass auch in Klimamodellen dekadische Variabilität als Eigenschwingung des Systems Ozean-Atmosphäre erzeugt werden kann [15], ohne zusätzlichen solaren Antrieb. Hier wird die PCPA eingesetzt, um die dekadische Variabilität des Klimasystems in ihrer räumlichen und zeitlichen Variabilität genau zu erfassen und für die saisonale Klimavorhersage nutzbar zu machen. Da die dekadischen Klimaschwankungen offensichtlich in Phase zu den solaren Strahlungsschwankungen sind, werden die Sonnenfleckenrelativzahlen als Antriebsgröße benutzt (siehe Abschnitt 3.2.3).

Der Effekt der solaren Strahlungsschwankungen im Winter ist nach den Arbeiten von Labitzke und van Loon mit der Phase der Quasi-Biennial-Oszillation (QBO), d.i. die Richtung des Zonalwindes in der Stratosphäre über dem Äquator, verknüpft. Nach einer Aufteilung der atmosphärischen Daten in die West- und die Ostphase der QBO, lassen sich Korrelationen zwischen den Sonnenflecken und verschiedenen Klimaelementen finden, wobei der Zusammenhang von der Stratosphäre bis in die untere Troposphäre reicht. Durch die Aufteilung der Daten wird ein mögliches Ausgleichen gegenläufiger Signale in den Phasen der QBO verhindert. Verläuft die Klimaänderung in einer Phase proportional und in der anderen Phase antiproportional zur Änderung der Sonnenfleckenrelativzahl, so ist die Korrelation der ungeteilten Datenmenge mit den Sonnenflecken reduziert und kann sogar ganz verschwinden. Die Einbeziehung der QBO birgt den Nachteil, daß die Analyse frühestens im Jahre 1952 beginnen kann, da erst ab diesem Zeitpunkt Abschätzungen der QBO vorliegen.

Wird die PCPA mit der Rangkorrelation nach Kendall auf den ungeteilten Datensatz angewendet, so können nur diejenigen Sonnensignale detektiert werden, die bei der Überlagerung der räumlichen Signalmuster aus der West- und der Ostphase übrig bleiben. Vergleicht man die Abbildungen des Abschnitts 4.3.3 mit den Korrelationskarten von Labitzke und van Loon, so ist dies in guter Näherung erfüllt. Der Verzicht auf die Unterteilung der Daten hat aber auch Vorteile. Es wird dadurch eine bessere statistische Absicherung der gefundenen Zusammenhänge erreicht. Im hier untersuchten Zeitintervall sind etwa 10 Zyklen der Sonnenflecken repräsentiert, wohingegen Labitzke und van Loon nur 3 Zyklen untersuchen konnten. Die Ergebnisse der PCPA zeigen, dass die dekadische Klimaschwankung nicht nur über 3 Zyklen, sondern über den gesamten Untersuchungszeitraum in Phase mit den solaren Strahlungsschwankungen ist, sofern diese von den Sonnenfleckenvariationen korrekt wiedergegeben werden. Auch die räumlichen Muster sind trotz des längeren Untersuchungszeitraums sehr ähnlich.

Im Folgenden werden die Signalmuster beschrieben und interpretiert. Die Ergebnisse der PCPA in Form von Kartendarstellungen findet man am Ende dieses Abschnitts.

#### 4.3.1 Diskussion

Ein besonders auffälliges Merkmal der Korrelationsrechnungen zwischen den solaren Strahlungsschwankungen und dem Klima ist die Ähnlichkeit der Signalmuster in den verschiedenen Jahreszeiten. Diese Ähnlichkeiten findet man in der Temperatur in allen Höhenschichten und im Geopotential der unteren Stratosphäre. Das 30-hPa Niveau der Stratosphäre zeigt positive Geopotentialanomalien in niedrigen und mittleren Breiten mit dem Schwerpunkt nahe 30° Nord über dem Atlantik und dem Pazifik. Negative Anomalien finden sich in den polaren Breiten. Dieses Muster bedeutet erhöhten Luftdruck in den niedrigen Breiten und verringerten Luftdruck in den hohen Breiten während eines Maximums der Sonnenaktivität. Es unterliegt leichten jahreszeitlichen Variationen, wobei die Anomalien im Juli und August am stärksten ausgeprägt sind.

Wie van Loon und Labitzke zeigen, sind die Geopotentialanomalien der Stratosphäre an Temperaturänderungen der Troposphäre gekoppelt. Dies wird durch die PCPA bestätigt, da besonders das Temperaturmuster eine ausgeprägte jahreszeitliche Konstanz der Anomalien aufweist (siehe Abschnitt 4.3.3). Mit den zur Verfügung stehenden Daten findet man Erwärmungen im subtropischen Atlantik in Europa und an der Westküste Nordamerikas. Abkühlungen treten in der Mitte und im Osten der USA auf. Aber auch Luftdruck und Niederschlag haben einiges an jahreszeitlich konstanten Mustern zu bieten, obwohl die Anomalien der einzelnen Monate weitaus variabler sind als bei der Temperatur.

Ein besonderes Merkmal des Luftdrucks ist das Band negativer Anomalien in den Subtropen, das vom zentralen Pazifik bis vor die Küste Afrikas reicht. Diese Anomalie korrespondiert von ihrer Lage und Ausdehnung her mit den positiven Geopotentialanomalien in der Stratosphäre. Assoziiert sind ebenfalls die erhöhten Temperaturen im subtropischen Atlantik. Auch im subtropischen Ostpazifik ist es im Sonnenmaximum wärmer als normal, was das Luftdruckmuster nahelegt und die Temperaturanalysen von van Loon und Labitzke [44] bestätigen, die den Pazifik mit einschließen. Wie van Loon und Labitzke weiter zeigen, ist dieses Anomalienmuster an eine verstärkte Hadleyzirkulation gebunden. Einer solchen Verstärkung entsprechen auch die positiven Luftdruckanomalien über Nordafrika, Zentralasien und dem Ostpazifik. Die Tatsache, dass im Ostpazifik negative, im Westpazifik dagegen positive SLPA auftreten, obwohl in beiden Fällen eine Verstärkung der Hadley-Zirkulation angenommen wird, kann an den unterschiedlichen Meeresoberflächentemperaturen in den beiden Gebieten liegen. In den Subtropen des Ostpazifik sind kalte Meeresströmungen vorherrschend, wogegen der Westpazifik wärmeres Wasser enthält. Verstärktes Absinken der Luftmassen in den Subtropen führt zu mehr Sonneneinstrahlung, so dass in der Nähe der Meeresoberfläche die Verdunstung steigt und in Bereichen mit relativ kaltem Wasser kann dieser Effekt das Absinken zumindest in der erdnahen Luftschicht überkompensieren.

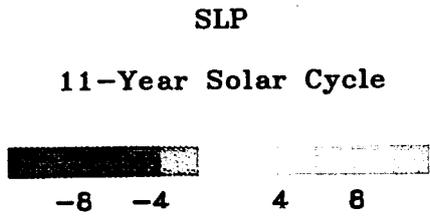
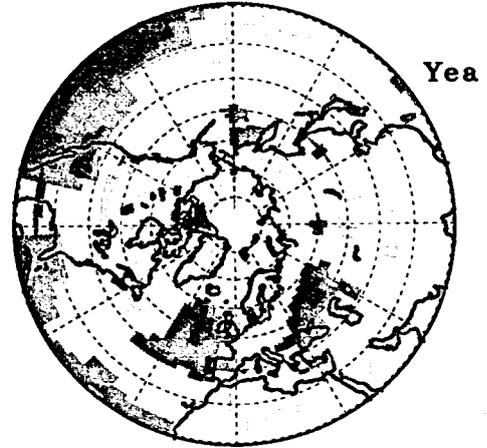
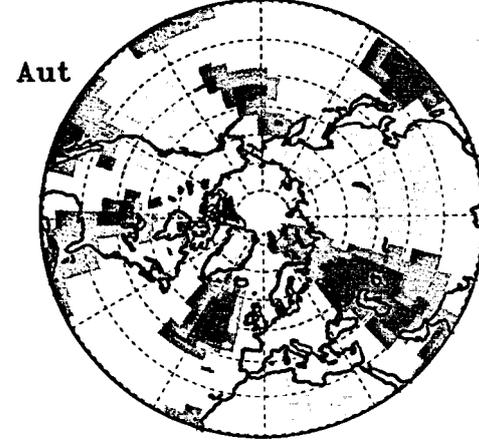
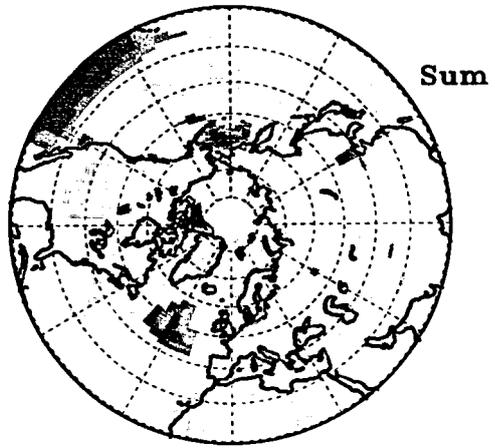
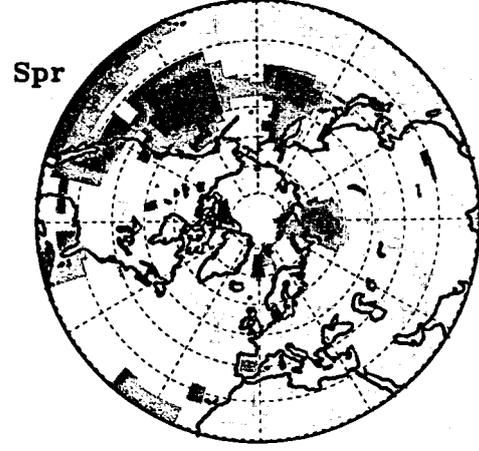
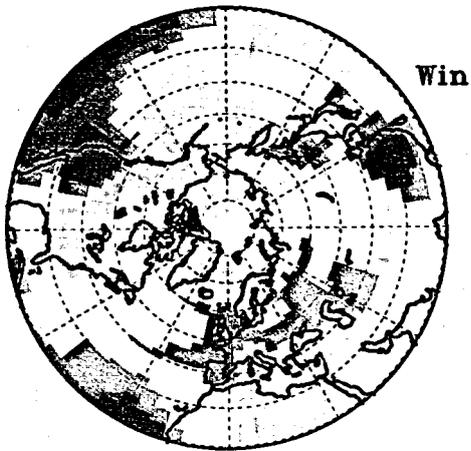
Der Niederschlag ist von den untersuchten Klimaelementen das mit der geringsten räumlichen Strukturierung. Es fällt auf, dass im Winter während eines solaren Maximums die Landgebiete der Tropen und Subtropen trockener werden, während in den mittleren und hohen Breiten mehr Niederschlag fällt. Trotz der höheren Variabilität der Niederschlagsmuster sind Abhängigkeiten zu den Temperatur und Luftdruckmustern zu erkennen. Als Beispiel seien hier die europäischen Anomalien im Dezember diskutiert. Reduzierter Luftdruck über weiten Teilen Europas ist mit kühleren Temperaturen im Nordwesten und wärmeren Luftmassen im Südosten assoziiert. Im Zentrum Europas fällt deshalb mehr Niederschlag als normal. Weitere Details können den Kartendarstellungen des Abschnitts 4.3.3 entnommen werden.

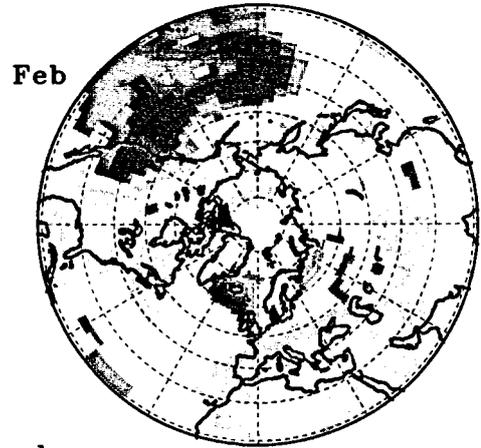
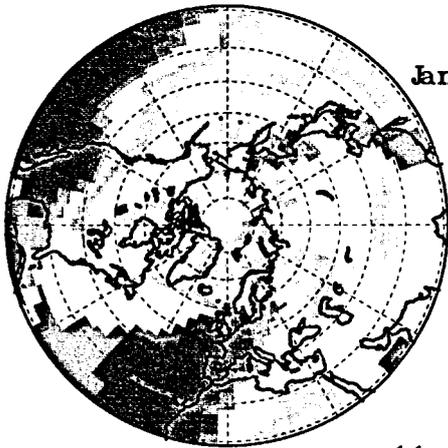
### 4.3.2 Wertung

Die Frage nach der Ursache des im Klimasystem beobachteten dekadischen Zyklus - Sonne oder Ozean - kann auch mit den hier vorgenommenen Analysen nicht endgültig beantwortet werden. Allerdings ist die Wahrscheinlichkeit für die Hypothese eines Sonneneinflusses gestiegen, da aufgrund der Analysen mit der PCPA eine Koheränz der Sonnenfleckenrelativzahlen mit dem dekadischen Klimazyklus über einen Zeitraum von 120 Jahren als gesichert gelten kann. Diese zeitliche Stabilität ermöglicht die Verwendung des quasi-11-jährigen Zyklus zur Klimavorhersage auch ohne die abschließende Klärung der Ursache.

### 4.3.3 Signalmuster

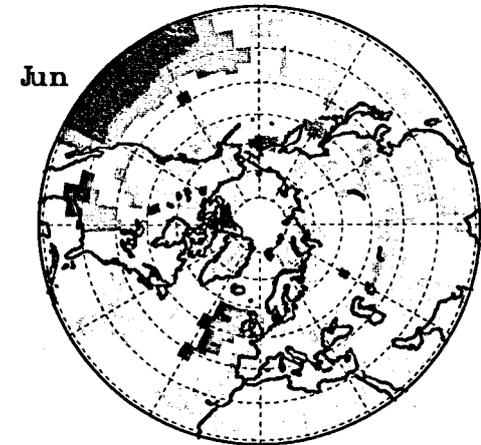
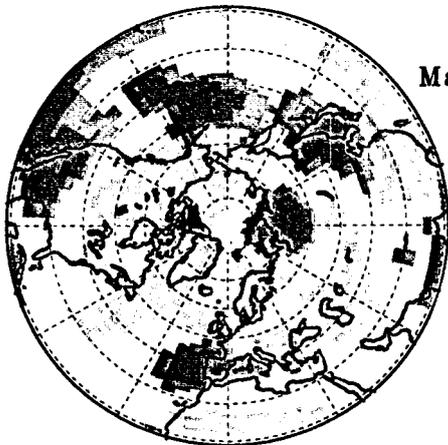
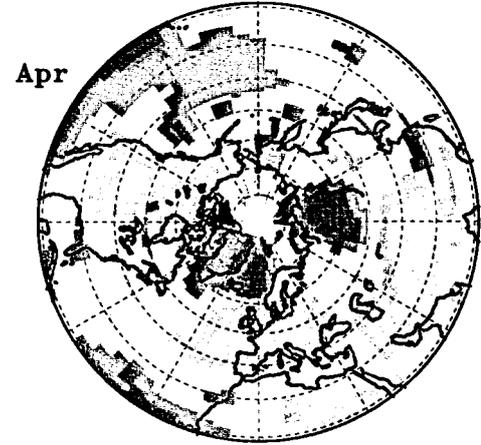
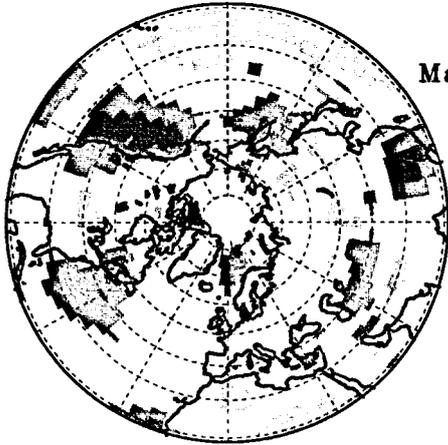
Dargestellt sind die Principal Correlation Pattern (PCP) der Sonnenfleckenrelativzahlen (siehe Abschnitt 3.2.3) im bodennahen Luftdruckfeld (SLP), in der Temperatur und im Niederschlag (Precipitation). Angegeben ist der Kendallsche Korrelationskoeffizient in Einheiten der Standardabweichung ( $2 \simeq 90\%$ ,  $3 \simeq 99.7\%$ ) zwischen der Zeitreihe der Sonnenflecken und den gefilterten Zeitreihen des jeweiligen Klimaelementes. Die Farbgebung ist so gewählt, dass im solaren Maximum die pinken (roten, gelben) Schattierungen einen Luftdruckanstieg (Temperaturanstieg, Trockenheit) anzeigen.

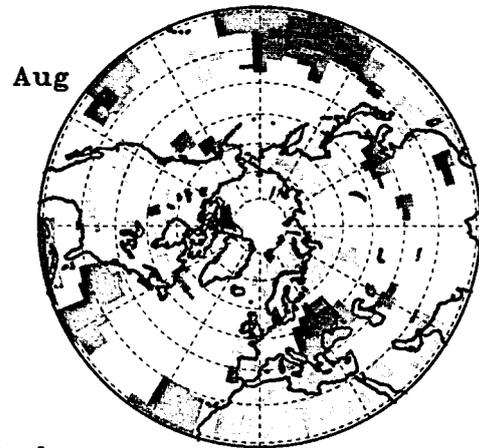
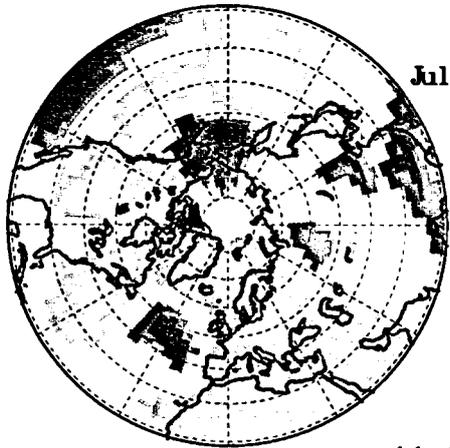




SLP

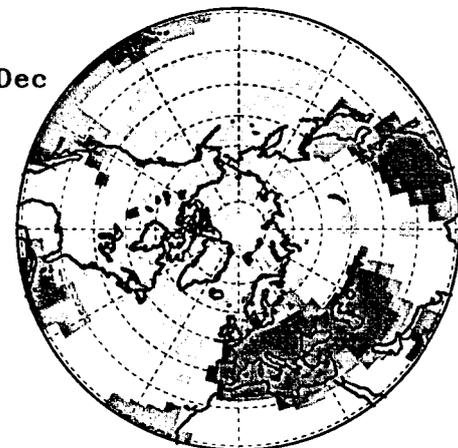
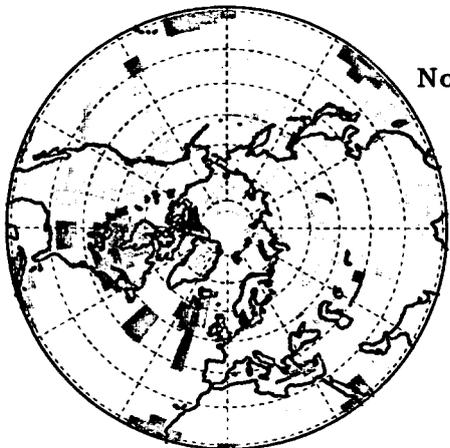
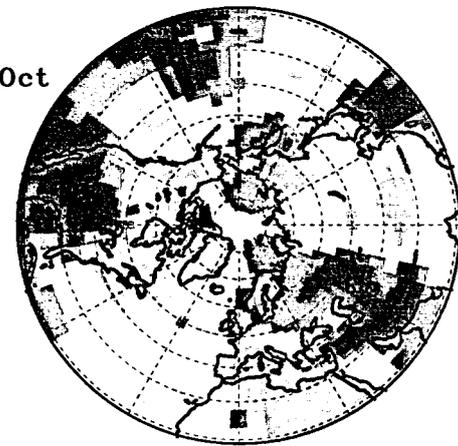
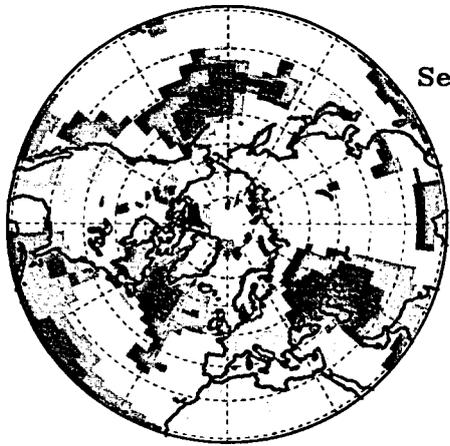
11-Year Solar Cycle

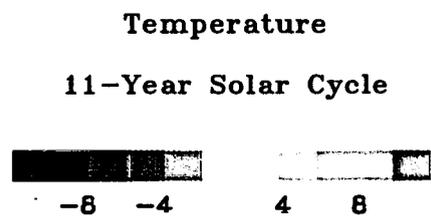
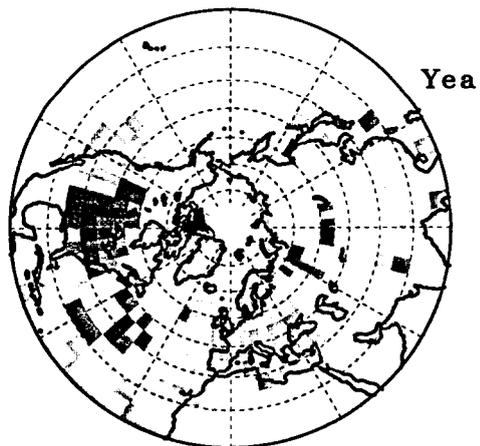
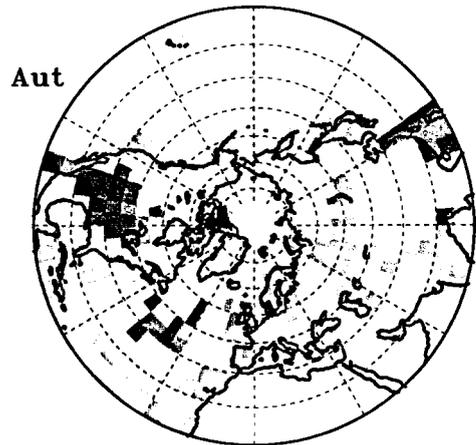
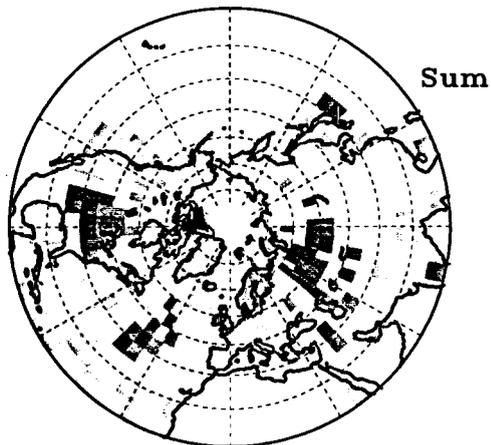
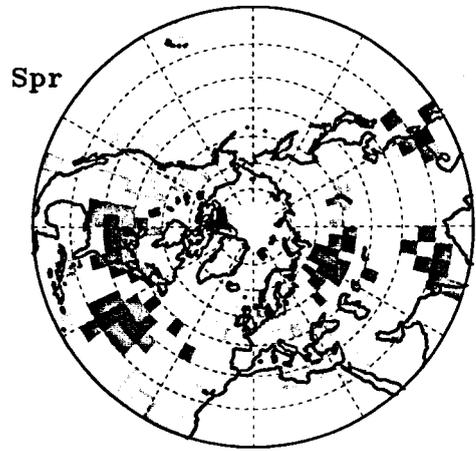
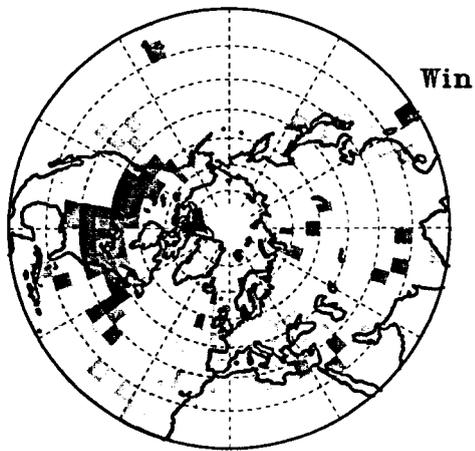


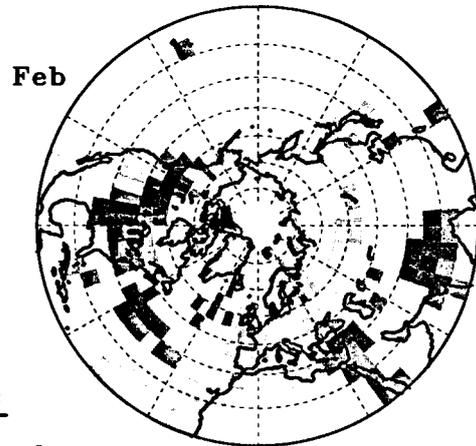
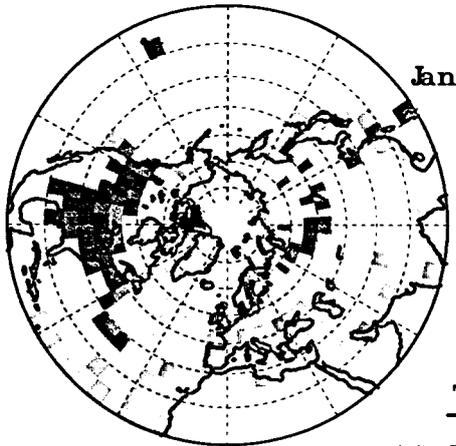


SLP

11-Year Solar Cycle

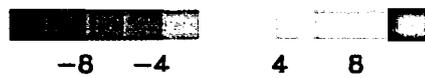
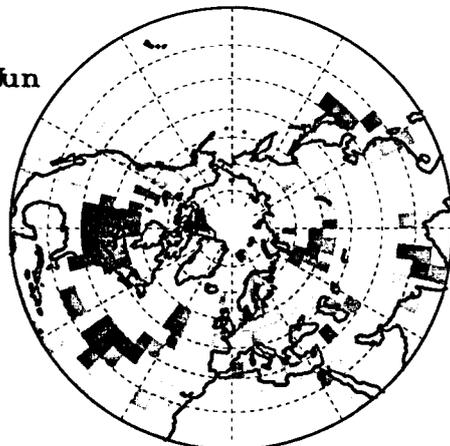
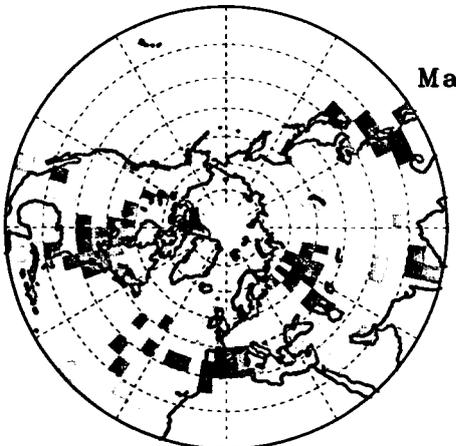
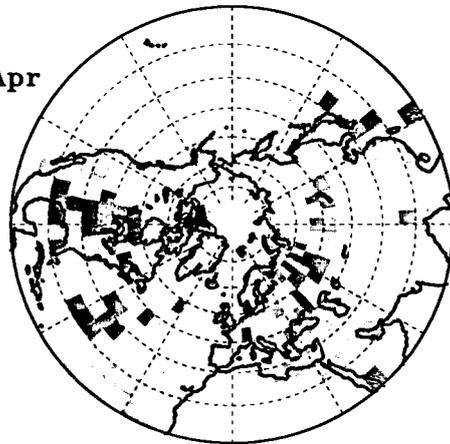
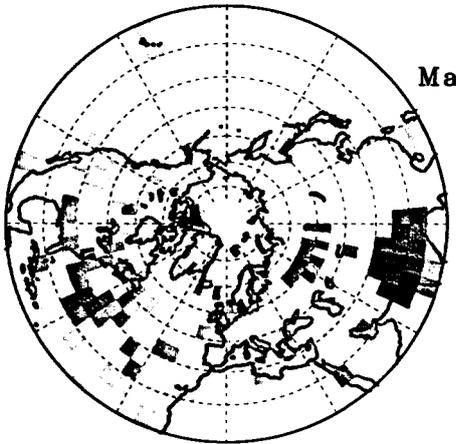


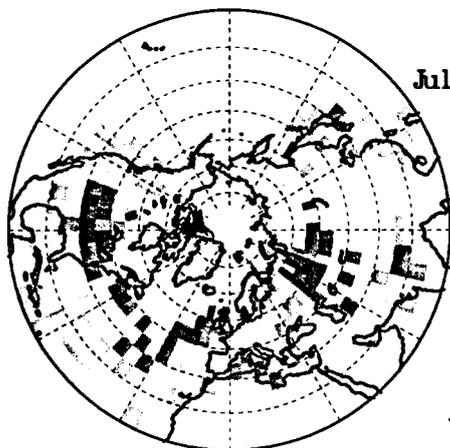




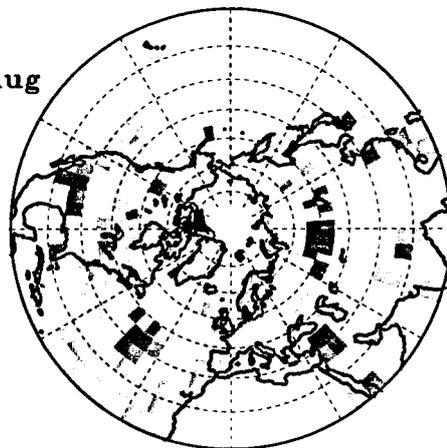
Temperature

11-Year Solar Cycle





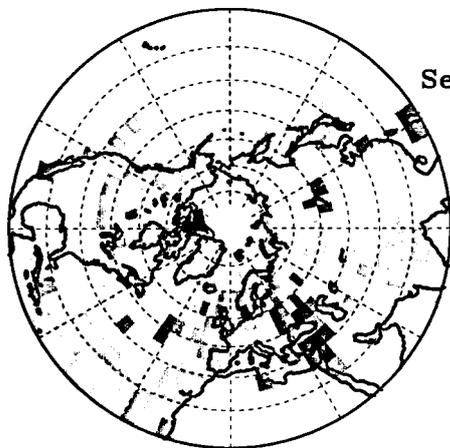
Jul



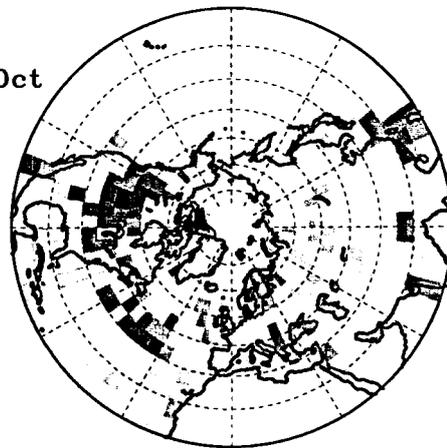
Aug

Temperature

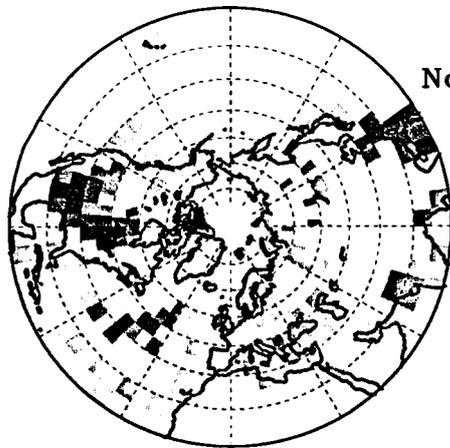
11-Year Solar Cycle



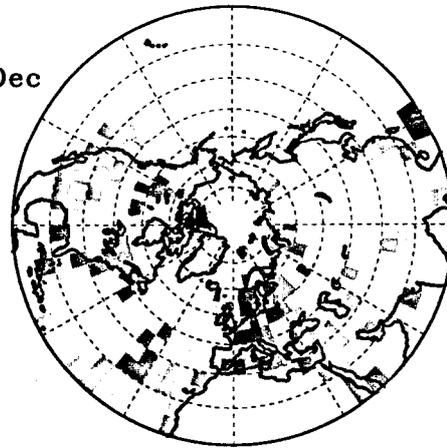
Sep



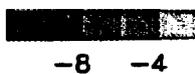
Oct



Nov



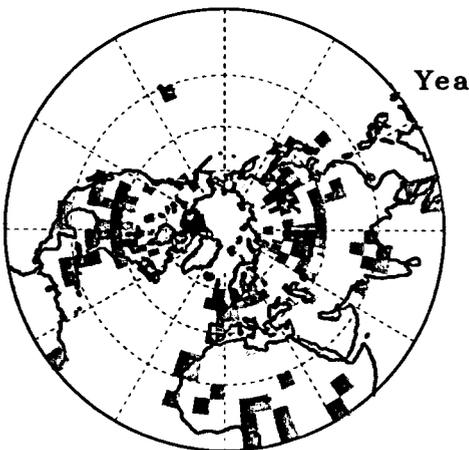
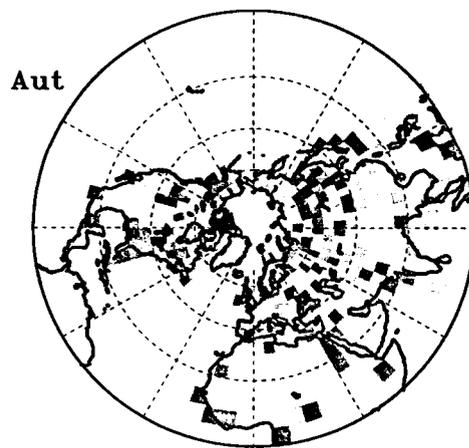
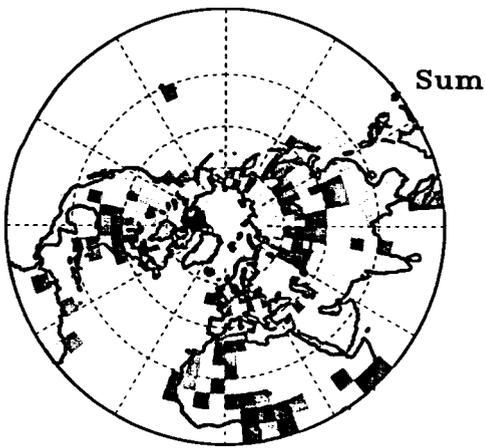
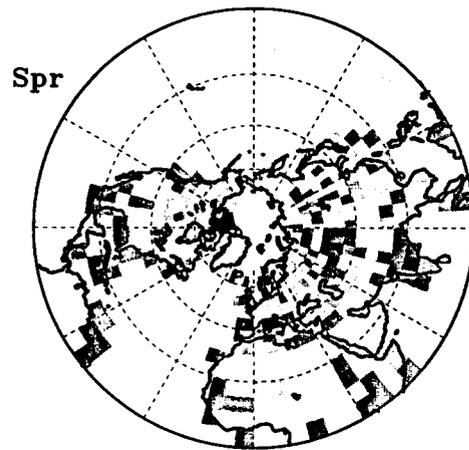
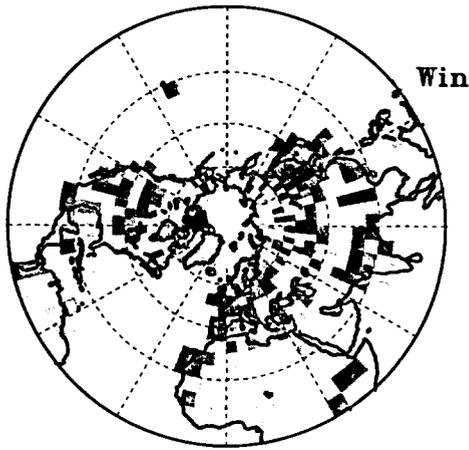
Dec



-8 -4



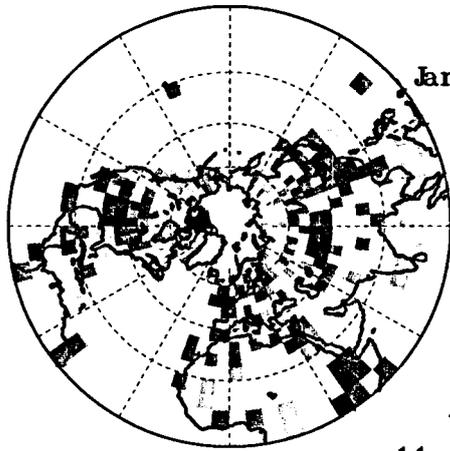
4 8



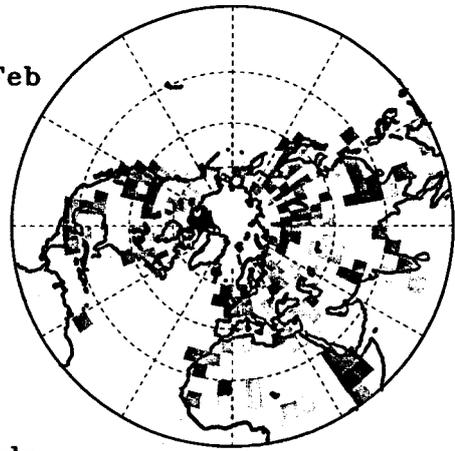
Precipitation

11-Year Solar Cycle





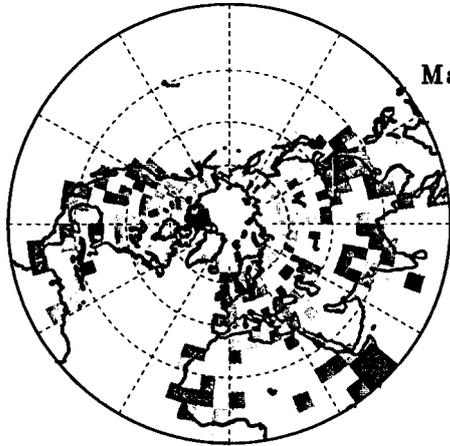
Jan



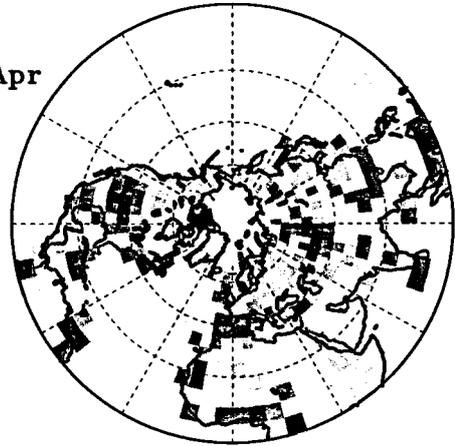
Feb

Precipitation

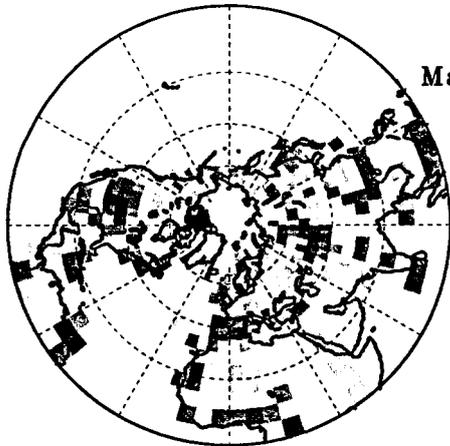
11-Year Solar Cycle



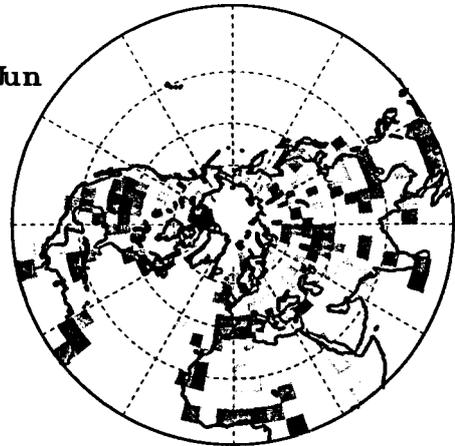
Mar



Apr

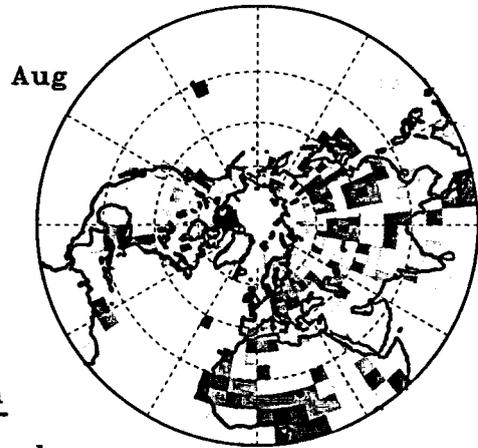
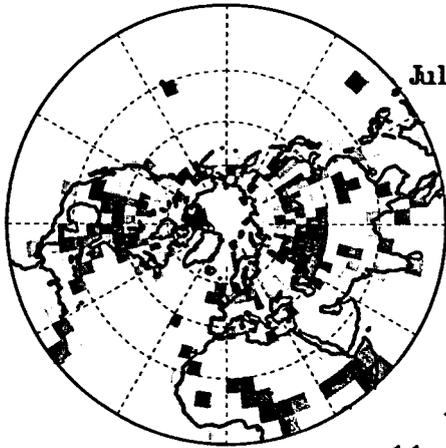


May



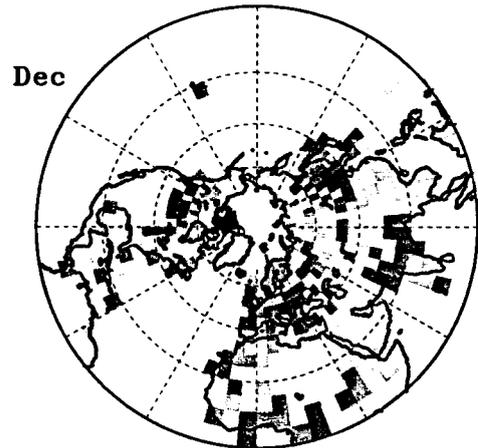
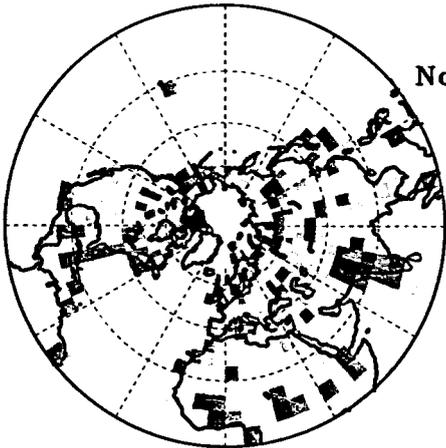
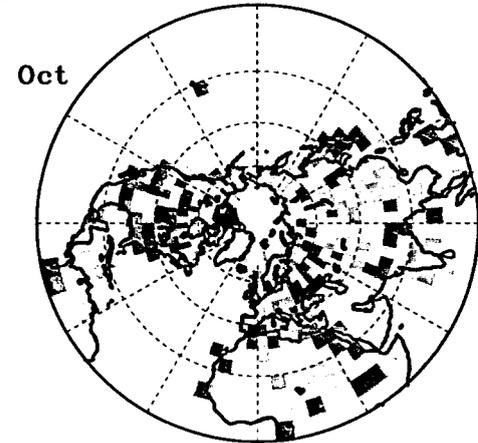
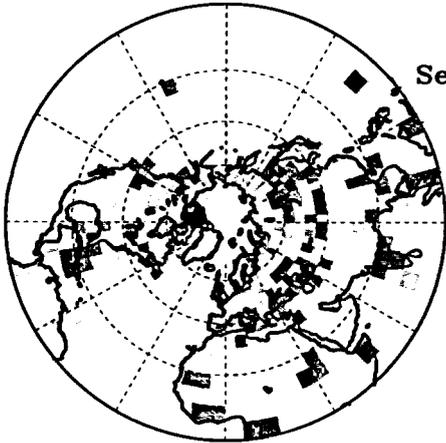
Jun





Precipitation

11-Year Solar Cycle



## Kapitel 5

# Europäische Klimavorhersage

Der hier vorgestellte Teil der statistisch dynamischen Klimavorhersage basiert auf der detaillierten Kenntnis über die für Europa relevanten Signalmuster der verschiedenen Antriebsmechanismen. Im Prinzip funktioniert ein solches Vorhersagemodell sehr einfach. Vorhersagen oder Szenarien über die zukünftige Entwicklung der Antriebsmechanismen werden in lokale Signalmuster umgesetzt. Die Gesamtheit aller Signalmuster ergibt dann die Vorhersage. Um eine solche Vorhersage erfolgreich durchführen zu können, müssen folgende Bedingungen erfüllt sein:

1. Kenntnis der relevanten Antriebsmechanismen.
2. Vorhersagbarkeit der Antriebsmechanismen.
3. Kenntnis der den Antrieben zugeordneten Signalmuster in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung.
4. Modellierung der Signale und der Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Antrieben.

Punkt 3 wurde im vorangegangenen Abschnitt kurz diskutiert und ist für die hier ausgewählten Antriebsmechanismen im Rahmen dieses Projektes erfolgreich durchgeführt worden. Zu den bereits bearbeiteten Antriebsmechanismen gehören die Nordatlantikoszillation (NAO) mit dem größten lokalen Bezug zur europäischen Klimavariabilität, das El-Niño-Phänomen und die solaren Strahlungsschwankungen (quasi-11-jähriger Zyklus der Sonnenflecken). Diese Auswahl ist keineswegs vollständig und muß in Zukunft erweitert werden. Kandidaten für diese Erweiterung sind die QBO (Quasi Biennial Oscillation), die MJO (Madden Julian Oscillation), der Vulkanismus und die Meeresoberflächentemperaturen im Atlantik. Insbesondere das zyklische Verhalten der ersten beiden Größen läßt sie als besonderes geeignet erscheinen.

Die Vorhersagbarkeit der innerhalb dieses Projektes diskutierten Antriebe ist sehr unterschiedlich zu bewerten. Für El Niño werden Vorhersagezeiten von einem halben bis zu etwa einem Jahr angegeben. Die Vorhersagbarkeit ist aber nicht immer gleich, sondern hängt vom Zustand des tropischen Pazifiks ab. Schwierig ist die Vorhersagbarkeit im Fall der NAO zu beurteilen, da alle bekannten Indizes der NAO ein sehr breitbandiges Spektrum nahe dem für weißes Rauschen aufweisen, so daß keine bevorzugte Zeitskala sichtbar ist. Es besteht allerdings die Hoffnung, zumindest gewisse Teile der NAO vorhersagen zu können. Dazu

zählt der Anteil einer QBO-ähnlichen Variation sowie die relativ stark vertretene dekadische Variabilität im Zeitbereich von etwa 7 bis 12 Jahren. Hier besteht noch ein erheblicher Forschungsbedarf, der über den Rahmen dieses Projekts hinausgeht.

Die statistisch dynamische Klimavorhersage im hier definierten Sinn enthält im wesentlichen zwei Arbeitsschritte: die Vorhersage der Antriebsmechanismen und die Umsetzung dieser Vorhersagen in räumlich und zeitlich hochaufgelöste Signalmuster. Ein wesentliches Ziel dieses Projektes ist die Detektion der Signalmuster und die Demonstration ihres Vorhersagepotentials. Letzteres soll nun erfolgen. Um dieses Vorhersagepotential tatsächlich beurteilen zu können, werden Vorhersagen nur für solche Jahre erstellt, in denen die Ausprägung der Antriebsmechanismen bekannt sind. Die Filterung und Modellierung der Signale erfolgt für den Zeitraum bis 1995, vorhergesagt werden die Jahre 1996, 1997 und 1998. Die Vorhersagen beschränken sich auf die bodennahe Lufttemperatur. Die Signalmuster sind in der Regel so großräumig, daß sich das Signalmuster für Deutschland bereits sehr gut auf dem europäischen Maßstab erkennen läßt.

## 5.1 El Niño

Das Maximum der El-Niño- oder La-Niña-Ausprägung ist durch das Maximum der Anomalie der Meeresoberflächentemperaturen (SSTA) im tropischen Pazifik gegeben, das irgendwann zwischen Oktober und Dezember auftritt. Im darauffolgenden Frühjahr beobachtet man eine Erwärmung Südwesteuropas, die nach der PCPA im März am deutlichsten ausgeprägt ist (siehe Abschnitt 4.1). Die Abbildung 5.1 zeigt eine Vorhersage des ENSO-Signals in Europa für den März 1998, ein El-Niño-Jahr. Die dargestellte Zeitreihe des PCP+ entsteht durch die Mittelung der mit der PCPA gefilterten Signale mit positiver Korrelation zu den Meeresoberflächentemperaturen im tropischen Pazifik (bzw. negativer Korrelation zum Southern Oscillation Index). Gezeigt wird außerdem die Anpassung eines linearen Regressionsmodells an diese gemittelte Zeitreihe für den Zeitraum von 1891 bis 1995. Man erkennt deutlich, daß die PCPA das europäische El-Niño-Signal aus den Beobachtungsdaten extrahiert. Allerdings gibt es auch einzelne Jahre mit starken Abweichungen von Filterung und Modell, deren genaue Ursache noch nicht geklärt ist. Ein Teil der Abweichungen ist aber sicherlich auf eine unvollständige Signal-Rausch-Trennung bei der PCPA aufgrund des relativ geringen Datenumfangs zurückzuführen.

Der Vergleich zwischen den tatsächlich beobachteten und den mit ENSO modellierten Temperaturanomalien zeigt, daß die Modellierung das räumliche Muster der Beobachtung sehr gut beschreibt. Allerdings sind die modellierten Amplituden der Signale viel zu klein. Da die NAO in ihrem mittleren Zustand war, d.h. keinen Beitrag zu den Klima-anomalien in Europa lieferte, und auch sonst keine Antriebsmechanismen einen relevanten Beitrag zu den Klima-anomalien leisteten, ist das im März 1998 beobachtete Temperaturmuster wahrscheinlich von El Niño dominiert worden. Daß die Signalamplituden zu klein geschätzt werden, liegt an der Mittelung des Regressionsmodells über viele Jahre. Darunter sind natürlich auch solche Jahre, in denen das El-Niño-Signal nicht so ungestört im Atlantik in Erscheinung treten konnte wie im März 1998. Bei der Modellierung der europäischen Temperaturanomalien spielt offensichtlich das Verhältniss zu anderen Antriebsmechanismen eine entscheidende Rolle. Sind alle anderen Antriebe vernachlässigbar klein, so kann sich ein bestimmtes Signal durchsetzen. Um diese Situation zu erfassen, ist ein nichtlinearer multipler Modellierungsansatz (z.B. neuronale Netze) mit verschiedenen Antrieben als Eingangsgrößen erforderlich.

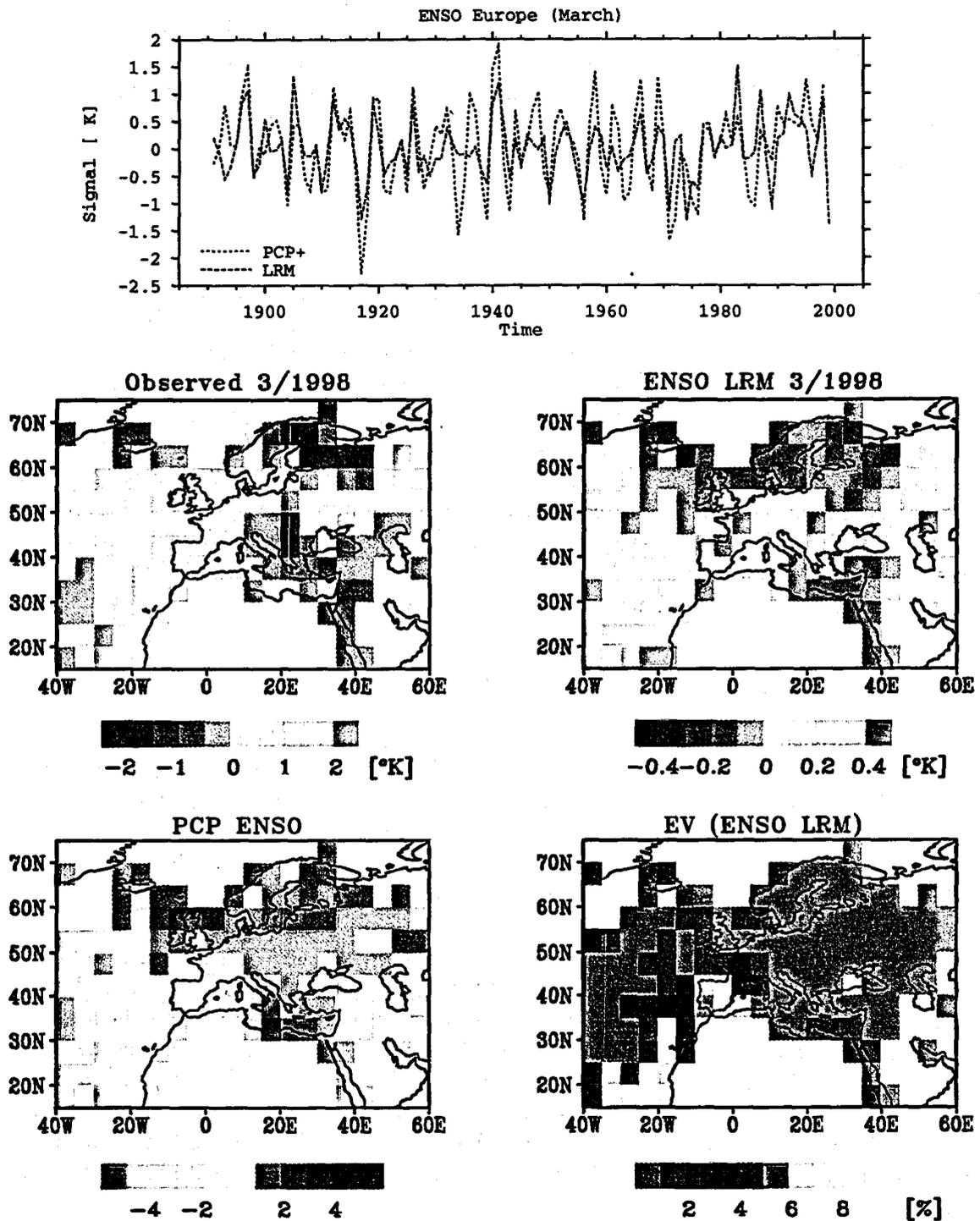


Abbildung 5.1: Vorhersage des ENSO-Signals der Temperatur in Europa für den März 1998 mit bekanntem SOI Index. Das obere Bild zeigt einen Vergleich der Zeitreihe des PCP mit der Anpassung eines linearen Regressionsmodells (LRM). Darunter folgen das beobachtete und das modellierte Muster (LRM), die räumliche Struktur des PCP sowie die erklärte Varianz des LRM.

Die beiden unteren Bilder der Abbildung 5.1 zeigen das PCP des ENSO-Signals (Kendall-scher Korrelationskoeffizient zwischen dem gefilterten Temperatursignal und dem SOI) und die erklärten Varianzen des Regressionsmodells an den lokal beobachteten Temperaturschwankungen. Die erklärten Varianzen liegen bei einigen Prozent, obwohl auch Zeiträume mit sehr viel stärkeren Signalanteilen auftreten können, wie es das Temperaturmuster im März 1998 zeigt.

## 5.2 NAO

Die NAO ist von Herbst bis ins Frühjahr hinein durch ein einheitliches Signalmuster gekennzeichnet (siehe Abschnitt 4.2). Dazu gehört eine massive Abkühlung in Mittel- und Nordeuropa während der negativen Phase der NAO. Wie die Abbildung 5.2 zeigt, war der März 1996 von der NAO geprägt, obwohl sich die Abkühlung nicht bis nach Skandinavien hinein ausgewirkt hat, wie es das Regressionsmodell vorhersagt. Für die NAO erreichen die erklärten Varianzen an der lokal beobachteten Temperaturvariabilität etwa 40%. Dies liegt weit über den Werten der anderen Signale. Das in der Abbildung 5.2 gezeigte gefilterte Temperatursignal der NAO wird durch Mittelung über alle mit der NAO positiv korrelierten Gitterpunktszeitreihen des PCP-Musters erzeugt. Auch hier zeigt die Modellierung des gefilterten Temperatursignals starke Abweichungen in einzelnen Jahren, obwohl insgesamt die beiden Zeitreihen in der Abbildung 5.2 gut korrelieren.

## 5.3 Solare Strahlungsschwankungen

In den europäischen Klimadaten lassen sich auch Schwankungen identifizieren, die in Phase mit den Sonnenflecken variieren. Charakteristisch ist ein quasi-11-jähriger Zyklus, der die Zeitreihe der Sonnenfleckenrelativzahlen dominiert. Die Abbildung 5.3 zeigt das solare Temperatursignal im September, das durch Mittelung der gefilterten Signale an den Gitterpunkten mit positiven Korrelationen zu den Sonnenfleckenvariationen (Westeuropa, PCP+) gewonnen wird. Offensichtlich ist die PCPA in der Lage, das solare Signal zu identifizieren, obwohl die Signale weniger als 5 Prozent der lokal beobachteten Variabilität ausmachen.

Die Frage nach einer Klimawirksamkeit solarer Strahlungsschwankungen, insbesondere des quasi-11-jährigen solaren Zyklus, ist weitgehend ungeklärt. Dies liegt vor allem an der sehr kleinen Amplitude des Antriebs, die nur etwa ein tausendstel der im Mittel einfallenden Globalstrahlung (extraterrestrische Solarkonstante) beträgt. Es sind Verstärkungsmechanismen erforderlich, die diesen kleinen Betrag in atmosphärisch relevante Größenordnungen potenzieren. Immerhin sind die in diesem Projekt gefundenen Sonnensignale - neben den Arbeiten von Labitzke und van Loon (z.B. [29]) - die einzigen Hinweise auf ein solares Signal mit einem quasi-11-jährigen Zyklus in räumlich hochaufgelösten bodennahen Beobachtungsdaten des 20. Jahrhunderts.

Das PCP in der Abbildung 5.3 zeigt Erwärmungen in Westeuropa und Abkühlungen in Osteuropa im Sonnenfleckenmaximum. Ein derartiges Muster wird in den Beobachtungsdaten des Septembers 1996, einem Jahr im solaren Minimum, nicht gefunden, wie der Vergleich des Regressionsmodells (LRM) mit den Beobachtungen zeigt. Allerdings besteht die Möglichkeit, daß der solare Einfluß das beobachtete Anomaliepattern zumindest mitgeprägt hat. Hier müssen weitere Analysen folgen, die unter anderem eine detaillierte Signalanalyse höherer atmosphärischer Schichten und dem Ozean enthalten sollten, um den möglichen Zusammen-

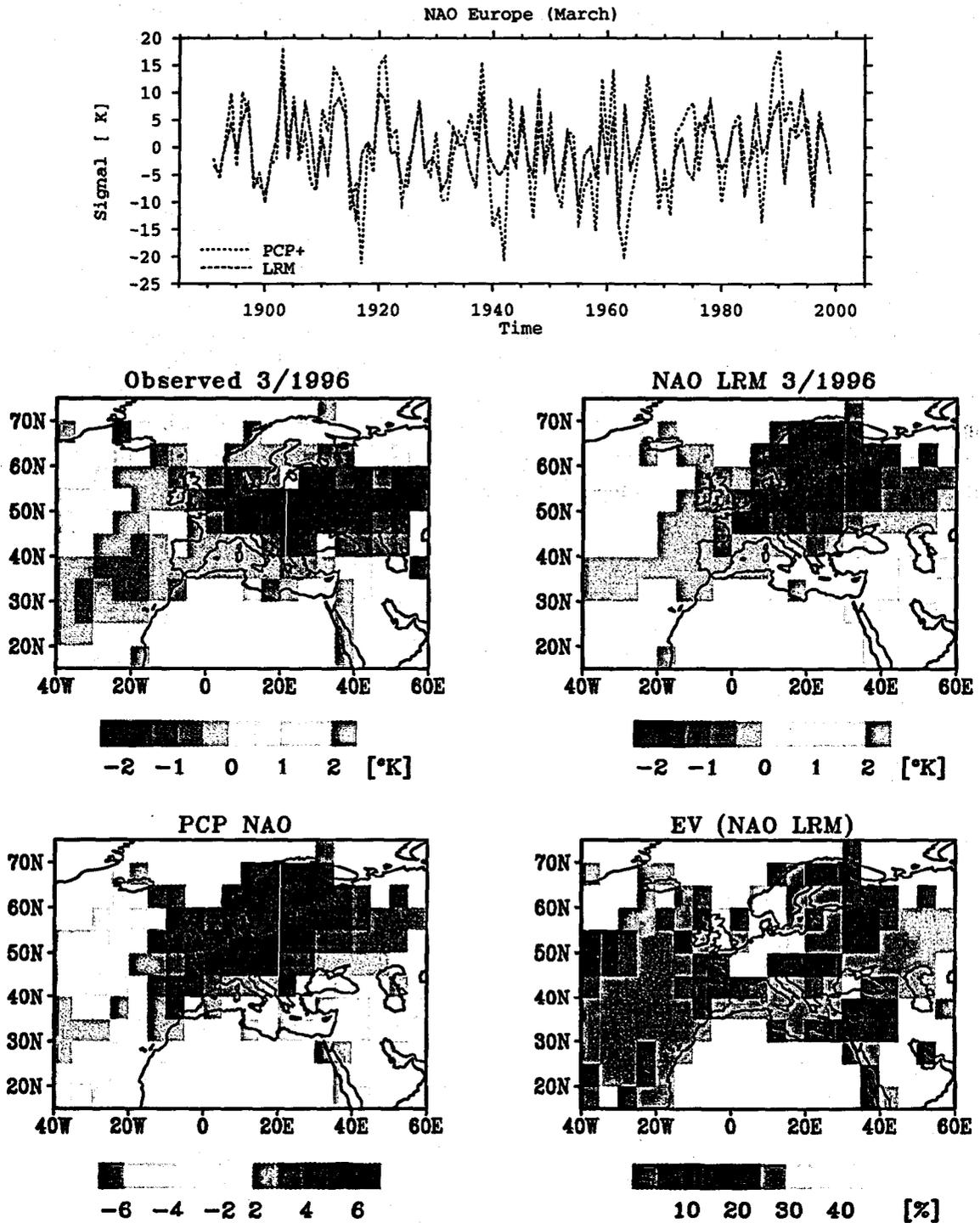


Abbildung 5.2: Vorhersage des NAO Signals der Temperatur in Europa für den März 1996 mit bekanntem NAO Index. Das obere Bild zeigt einen Vergleich der Zeitreihe des PCP mit der Anpassung eines linearen Regressionsmodells (LRM). Darunter folgen das beobachtete und das modellierte Muster (LRM), die räumliche Struktur des PCP sowie die erklärte Varianz des LRM.

hang der bodennahen Anomalien mit dem Ozean und der Stratosphäre aufzuklären. Dies würde zu einer verbesserten Modellierung der solaren Signale und ihrer Wechselwirkungen im Klimasystem beitragen.

#### 5.4 Wertung

Die Durchführung erster einfacher Modellierungsversuche der Wirkungen der verschiedenen externen und internen Prozesse im Klimasystem auf Europa hat gezeigt, daß hier ein Potential zur Vorhersage existiert. Zwar liegen die erklärten Varianzen der Signale in Europa teilweise nur bei einigen Prozent, allerdings kann die Bedeutung eines Prozesses in bestimmten Situationen weitaus größer sein, als es dieser Wert suggeriert (siehe Abschnitt 3.1). Zudem sind noch nicht alle denkbaren Prozesse mit Vorhersagepotential in den Klimadaten identifiziert und mit der PCPA in räumliche Wirkungsmuster umgesetzt. Aber bereits der Erfolg der bisher durchgeführten Signalanalyse begründet die Hoffnung, daß die Überlagerung vieler kleiner Beiträge letztendlich zu einem konsistenten Gesamtbild führt. Bis dahin bleibt allerdings noch einiges an Forschungsarbeit zu leisten.

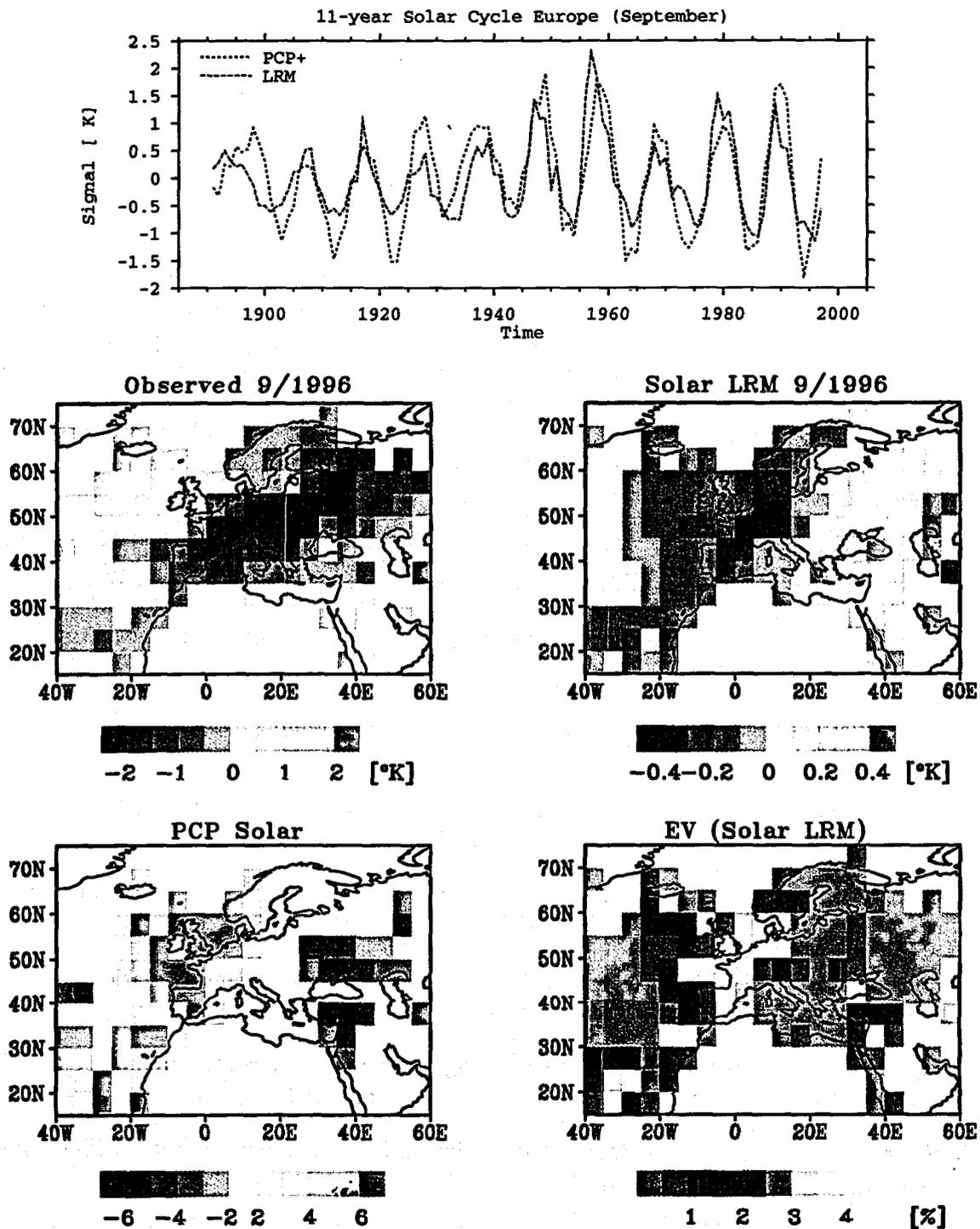


Abbildung 5.3: Vorhersage des solaren Signals der Temperatur in Europa für den September 1996 bei bekannter Zahl der Sonnenflecken. Das obere Bild zeigt einen Vergleich der Zeitreihe des PCP mit der Anpassung eines linearen Regressionsmodells (LRM). Darunter folgen das beobachtete und das modellierte Muster (LRM), die räumliche Struktur des PCP sowie die erklärte Varianz des LRM.

# Literaturverzeichnis

- [1] T. P. Barnett and R. W. Preisendorfer. Origins and levels of monthly and seasonal forecast skill for united states surface air temperatures determined by canonical correlation analysis. *Mon. Wea. Rev.*, 115:1825-1850, 1987.
- [2] T. A. Basnett and D. E. Parker. Development of the global mean sea level pressure data set gmslp2. Technical Report Climatic Research Technical Note No. 79, Hadley Centre, Meteorological Office, 1992.
- [3] C. S. Bretherton, C. Smith, and J. M. Wallace. An intercomparison of methods for finding coupled patterns in climate data. *Journal of Climate*, 5:541-560, 1992.
- [4] D. S. Broomhead and G. P. King. Extracting qualitative dynamics from experimental data. *Physica D*, 20:217-236, 1986.
- [5] M. Denhard. Principal correlation patterns: method and application to the ENSO-NAO relationship. Submitted to *Clim. Res.*, 2000.
- [6] W. Ebisuzaki. A method to estimate the statistical significance of a correlation when the data are serially correlated. *J. Clim.*, 10:2147-2153, 1997.
- [7] D. B. Enfield and D. A. Mayer. Tropical Atlantic SST variability and its relation to El Niño Southern Oscillation. *J. Geophys. Res.*, 102:929-945, 1996.
- [8] P. V. Foukal and J. Lean. An empirical model of total solar irradiance variation between 1874 and 1988. *Science*, 247:556-558, 1990.
- [9] K. Fraedrich. European Grosswetter during the warm and cold extremes of the El Niño/Southern Oscillation. *Int. J. Climatol.*, 10:21-31, 1990.
- [10] K. Fraedrich and K. Müller. Climate anomalies in Europe associated with ENSO extremes. *Int. J. Climatol.*, 12:25-31, 1992.
- [11] E. Friis-Christensen and K. Lassen. Length of the solar cycle: An indicator of solar activity closely associated with climate. *Science*, 254:698-700, 1991.
- [12] R. L. Gilliland. Solar, volcanic and  $CO_2$ -forcing of recent climatic changes. *Climatic Change*, 4:111-131, 1982.
- [13] R. Glowienka-Hense. The North Atlantic Oscillation in the Atlantic European SLP. *Tellus*, 42A:497-507, 1990.

- [14] M. S. Halpert and C. F. Ropelewski. Surface temperature patterns associated with the Southern Oscillation. *J. Clim.*, 5:577-593, 1992.
- [15] D. Handorf, V. K. Petoukhov, K. Dethloff, A. V. Eliseev, A. Weisheimer, and I. I. Mokhov. Decadal climate variability in a coupled atmosphere-ocean climate model of moderate complexity. *J. Geophys. Res.*, 104, NO. D22:27253-27275, 1999.
- [16] D. E. Harrison and N. K. Larkin. El Niño-Southern Oscillation sea surface temperatures and wind anomalies, 1946-1993. *Rev. Geophys.*, 36, 3:353-399, 1998.
- [17] M. P. Hoerling, A. Kumar, and M. Zhong. El Niño, La Niña and the nonlinearity of their teleconnections. *J. Clim.*, 10:1769-1786, 1997.
- [18] J. T. Houghton, L.G. Meira Filho, B.A. Callandar, N. Harris, A. Kattenberg, and K. Maskell, editors. *Climate Change 1995, The Science of Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, 1996.
- [19] D. V. Hoyt and A. Eddy. An atlas of variations in the solar constant caused by sunspot blocking and facular emissions from 1874-1981. In *Publ. Nr. TN 194 + STR*. National Center for Atmospheric Research, Boulder, 1982.
- [20] D. V. Hoyt and K. H. Schatten. A discussion of plausible solar irradiance variations, 1700-1992. *Journal of Geophysical Research*, 98:895-906, 1993.
- [21] J. W. Hurrell. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperatures and precipitation. *Science*, 269:676-679, 1995.
- [22] J. W. Hurrell. Influence of variations in extratropical wintertime teleconnections on Northern Hemisphere temperature. *Geophys. Res. Lett.*, 23:665-668, 1996.
- [23] J. W. Hurrell and H. van Loon. Decadal variations in climate associated with the North Atlantic Oscillation. *Climatic Change*, 36:301-326, 1997.
- [24] P. D. Jones, T. Jonsson, and D. Wheeler. Extension to the North Atlantic Oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and South-West Iceland. *Int. J. Climatol.*, 17:1433-1450, 1997.
- [25] P. D. Jones, T. J. Osborn, and K. R. Briffa. Estimating sampling errors in large-scale temperature averages. *J. Climate*, 10:2548-2568, 1997.
- [26] I. Kirchner and H. F. Graf. Volcanos and el niño: signal separation in northern hemisphere winter. *Climate Dynamics*, 11:341-358, 1995.
- [27] K. Labitzke. Sunspots, the qbo and the stratospheric temperature in the north polar region. *Geophys. Res. Lett.*, 14:535-537, 1987.
- [28] K. Labitzke and H. van Loon. Association between the 11-year solar cycle, the qbo and the atmosphere. part i: The troposphere and stratosphere on the northern hemisphere in winter. *J. Atmos. Terres. Phys.*, 50:197-206, 1988.
- [29] K. Labitzke and H. van Loon. Association between the 11-year solar cycle, the QBO and the atmosphere. Part III: Aspects of the Association. *Journal of Climate*, 2:554-565, 1989.

- [30] T. Landscheidt. Solar rotation, impulses of the torque in the sun's motion, and climatic variation. *Climatic Change*, 12:265-295, 1988.
- [31] R. B. Lee. Earth radiation budget satellite extraterrestrial solar constant measurements: 1986-1987 increasing trend. *Adv. Space Res.*, 8:11-13, 1988.
- [32] H. Paeth, A. Hense, R. Glowienka-Hense, R. Voss, and U. Cubasch. The North Atlantic Oscillation as an indicator for greenhouse-gas induced regional climatic change. 199.
- [33] J. M. Perlwitz and H. F. Graf. The statistical connection between tropospheric and stratospheric circulation of the northern hemisphere in winter. *Journal of Climate*, 8:2281-2295, 1995.
- [34] S. G. Philander. El niño, la niña and the southern oscillation. In R. Dmowska and J. R. Holton, editors, *International Geophysics Series*, volume 46. Academic Press, San Diego, New York, 1990.
- [35] J. C. Rogers. The association between the North Atlantic Oscillation and the Southern Oscillation in the Northern Hemisphere. *Mon. Wea. Rev.*, 112:1999-2015, 1984.
- [36] C.-D. Schönwiese, R. Ullrich, F. Beck, and J. Rapp. Solar signals in global climatic change. *Climatic Change*, 27:259-281, 1994.
- [37] D. W. J. Thompson and J. M. Wallace. Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophys. Res. Lett.*, 25:1297-1300, 1998.
- [38] K.E. Trenberth, G. W. Branstator, D. Karoly, A. Kumar, N. C. Lau, and C. Ropelewski. Progress during TOGA in understanding and modeling global teleconnections associated with tropical sea surface temperatures. *J. Geophys. Res.*, 103, NO. C7:14291-14324, 1998.
- [39] A. A. Tsonis, J. B. Elsner, and K.P. Georgakakos. Estimating the dimension of weather and climate attractors: Important issues about the procedure and interpretation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 50:2549-2555, 1993.
- [40] U. Ulbrich, H. F. Graf, and I. Kirchner. The impact of el niño and volcanic forcing on the atmospheric energy cycle and the zonal mean atmospheric circulation. *Beitr. Phys. Atmos.*, 68(1):59-74, 1995.
- [41] H. v. Loon and R. A. Madden. The southern oscillation. Part I: global associations with pressure and temperatures in northern winter. *Mon. Wea. Rev.*, 109:1150-1162, 1981.
- [42] H. v. Storch and F. W. Zwiers. *Statistical Analysis in Climate Research*. Cambridge University Press, Cambridge, 1999.
- [43] H. van Loon and K. Labitzke. The Southern Oscillation. Part V: The anomalies in the lower stratosphere of the Northern Hemisphere in Winter and a comparison with the Quasi-Biennial Oscillation. *Mon. Wea. Rev.*, 115:357-369, 1987.
- [44] H. van Loon and K. Labitzke. Association between the 11-year solar cycle, the qbo and the atmosphere. part ii: Surface and 700 mb in the northern hemisphere in winter. *Journal of Climate*, 1:905-920, 1988.

- [45] R. Vautard and M. Ghil. Singular spectrum analysis in nonlinear dynamics with applications to paleoclimatic time series. *Physica D*, 35:395, 1989.
- [46] Verlag Wetter und Leben der Österreichischen Gesellschaft für Meteorologie. *verschiedene Jahrgänge*, Wien, 1996.
- [47] M. Waldmeier. *The sunspot activity in the years 1610-1960*. Schulthess, Zürich, 1979.
- [48] J. M. Wallace and D. S. Gutzler. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. *Mon. Wea. Rev.*, 109:784-812, 1981.